



Fachhochschule Osnabrück
University of Applied Sciences

Pixel und Profile

Fernerkundung
in den
Bodenwissenschaften

Beiträge
Diskussionsforum
Bodenwissenschaften

Heft 6

Osnabrück
27. Oktober 2005

Fakultät

Agrarwissenschaften &
Landschaftsarchitektur

Pixel und Profile

Fernerkundung in den Bodenwissenschaften

Beiträge zum Diskussionsforum Bodenwissenschaften

Heft 6

Fachhochschule Osnabrück

Fakultät Agrarwissenschaften & Landschaftsarchitektur

Studiengang Bodenwissenschaften

am 27. Oktober 2005

Impressum

Diskussionsforum Bodenwissenschaften 6:
Pixel und Profile – Fernerkundung in den Bodenwissenschaften

Herausgeber:
Studiengang Bodenwissenschaften
in der Fakultät Agrarwissenschaften & Landschaftsarchitektur
Stiftung Fachhochschule Osnabrück
Oldenburger Landstr. 24
49090 Osnabrück
Telefon: 0541-969-5110
Telefax: 0541-969-5170
e-mail: al@fh-osnabrueck.de
Internet: <http://www.al.fh-osnabrueck.de>

Redaktion und Layout:
Prof. Dr. Rüdiger Anlauf (r.anlauf@fh-osnabrueck.de)
Prof. Dr. Martina Klärle (m.klaerle@fh-osnabrueck.de)

Für den Inhalt der Einzelbeiträge zeichnen die Autoren verantwortlich

Vorwort

Im Rahmen des Studiengangs Bodenwissenschaften an der Fachhochschule Osnabrück wurde im Jahr 1999 das erste „Diskussionsforum Bodenwissenschaften“ durchgeführt und seitdem als jährliche Fachtagung etabliert. Das Diskussionsforum Bodenwissenschaften verfolgt das Ziel, den fachlichen Dialog zwischen Personen aus der bodenkundlichen Berufspraxis und Studierenden sowie Lehrenden des Studiengangs Bodenwissenschaften zu intensivieren.

In diesem Jahr steht die Nutzung von Fernerkundungsdaten für die bodenkundliche Praxis im Mittelpunkt des Bodenforums. Der quantitative und qualitative Anstieg in der Bereitstellung von Fernerkundungsdaten, die Entwicklung neuer Analyse- und Bewertungssoftware sowie die Nutzung verbesserter hochauflösender Sensoren lässt das Interesse der Bodenkunde an der Fernerkundung stetig steigen.

Trotz umfassender und häufig flächendeckend vorhandener Datenbestände und der immer günstiger werdenden Anschaffungskosten für Fernerkundungsdaten steht die Nutzung der Fernerkundung für Informationen über Bodeneigenschaften noch am Anfang der Entwicklung. Deshalb sehen wir innerhalb des großen Themas Bodennutzung und Bodenschutz ein sehr großes Entwicklungspotential, das wir aufgreifen möchten.

Das diesjährige Diskussionsforum „Pixel und Profile - Fernerkundung in den Bodenwissenschaften“ spannt einen Bogen von den neuen hochauflösenden Sensoren über die Entwicklung verschiedener Bewertungsmethoden bis hin zu konkreten Anwendungsbeispielen. Die Nutzung von Fernerkundungsdaten aus verschiedenen Systemen (unterschiedliche Sensoren, Luftbilder, Flugzeugscannerdaten, Nahbeobachtung mit Digitalkameras) und für verschiedene Skalen (Feldgröße, kleinere Gebiete und Regionen) werden vorgestellt und im Hinblick auf die Bereitstellung bodenkundlicher Informationen bewertet.

Herzlich bedanken möchten wir uns bei den Referentinnen und Referenten für die Vorträge und Ausarbeitung der Manuskripte sowie allen Teilnehmern des Bodenforums. Die Fakultät Agrarwissenschaften & Landschaftsarchitektur unterstützt die Tagung und den vorliegenden Tagungsband. Auch hierfür sei ganz herzlich gedankt

Osnabrück, Oktober 2005

Rüdiger Anlauf
Martina Klärle

Anschriften der Referenten

- Prof. Dr. Manfred Ehlers** Universität Osnabrück
 Institut für Geoinformatik und Fernerkundung
 Postfach 1553
 49364 Vechta
 manfred.ehlers@uos.de
- Prof. Dr. Cornelia Gläßer** Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
 Institut für Geographie, FG Geofernerkundung
 Von-Seckendorff-Platz 4
 D-06120 Halle
 E-mail: cornelia.glaesser@geo.uni-halle.de
- Stefan Hinck** Fachhochschule Osnabrück
 Fakultät Agrarwissenschaften und Landschaftsarchitektur
 Postfach 1940
 490090 Osnabrück
 E-mail: s.hinck@fh-osnabrueck.de
- Prof. Dr. Martina Klärle** Fachhochschule Osnabrück
 Fakultät Agrarwissenschaften & Landschaftsarchitektur
 Postfach 1940
 49009 Osnabrück
 E-mail: m.klaerle@fh-osnabrueck.de
- Dr. Holger Lilienthal** Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft - FAL
 Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde
 Bundesallee 50
 38118 Braunschweig
 E-mail: holger.lilienthal@fal.de
- Dr. Mohamed Mounkaila** Universität Hohenheim
 Institut für Bodenkunde und Standortlehre
 70593 Stuttgart
 E-mail: mounkail@uni-hohenheim.de
- Prof. Dr. Ing Manfred Weisensee** Fachhochschule Oldenburg/Ostfriesland/Wilhelmshaven,
 Institut für Angewandte Photogrammetrie und Geoinformatik
 (IAPG)
 Ofener Straße 16/19
 26121 Oldenburg
 E-Mail: weisensee@fh-oldenburg.de

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	3
Anschriften der Autoren	4
Inhaltsverzeichnis	5
Neue Sensoren und Methoden in der Fernerkundung: Zwischen hochauflösend und hyperspektral (Manfred Ehlers)	7
Bodengestützte fernerkundliche Dauerbeobachtung – Erfahrungen des Einsatzes von „Lassie“ im landwirtschaftlichen Versuchswesen (Holger Lilienthal & Ewald Schnug)	17
Multispektrale Sensoren zur Erfassung von Schadstoffen in Pflanzen in der biologischen Bodensanierung (Andreas Fisler & Manfred Weisensee)	27
Vorstellung des Multi-Bodensensorsystems der Fachhochschule Osnabrück und Vergleichsmöglichkeiten zwischen Luftbildern und Leitfähigkeitsmessungen (Stefan Hinck, Klaus Mueller, Norbert Emeis und Olaf Christen)	37
Characterization of Soil/Sediment Surfaces in the Arid and Semi-arid Zones by Means of Remote Sensing (Mohammed Mounkaila, Ludger Herrmann, Thomas Gaiser, Thomas Maurer und Karl Stahr)	43
Charakterisierung der spektralen Reflektionseigenschaften von Bodenparametern mittels Labor- und Feldspektrometrie und hyperspektralen casi-Flugzeugscannerdaten (Cornelia Gläßer)	49
Einsatzgebiete und Analysemethoden der Bodenmodellierung durch hochauflösende Flugzeugscannerdaten (Martina Klärle & Sandra Lanig)	51

Neue Sensoren und Methoden in der Fernerkundung: Zwischen hoch auflösend und hyperspektral

Manfred Ehlers

Zusammenfassung

Dieser Überblicksbeitrag diskutiert das Potenzial moderner Fernerkundungssensoren für die Erdbeobachtung. Nach einer kurzen Taxonomie von Fernerkundungssystemen werden die neuen hoch auflösenden Satelliten- und Fluzeugsensoren sowie ihre technischen Parameter vorgestellt. Der letzte Teil widmet sich den Möglichkeiten der hyperspektralen Fernerkundung, deren Potenzial derzeit noch nicht voll realisiert werden kann.

1. Einleitung

Oberflächen und Gegenstände auf der Erdoberfläche reagieren aufgrund ihrer Zusammensetzung und Struktur unterschiedlich auf die einfallende Sonnenstrahlung. Diese wird je nach chemischer bzw. physikalischer Beschaffenheit der Oberflächen zu Teilen absorbiert, reflektiert oder transmittiert. Die Anteile der absorbierten, reflektierten und transmittierten Strahlung variieren dabei wellenlängenabhängig. So verfügt jede Oberfläche über eine spezifische Reflexionscharakteristik; sie besitzt materialtypische spektrale Merkmale (*spectral features*), durch die sie identifiziert und von anderen Oberflächen unterschieden werden kann.

Diese elektromagnetische Strahlung wird von der Fernerkundungssensoren, die auf Flugzeugen oder Satelliten eingesetzt werden, aufgenommen, aufgezeichnet und anschließend in Bildverarbeitungssystemen ausgewertet. Fernerkundung wird allgemein definiert als „Informationsgewinnung über Objekte ohne mit ihnen selbst in Berührung zu kommen“ (Jensen 2000). Im Laufe ihrer Entwicklung hat sich die Fernerkundung von ihrem Ursprung, der Luftbildfotografie, weit entfernt. Elektromagnetische Wellenlängen, die für die Gewinnung von Informationen über die Erdoberfläche genutzt werden können, erstrecken sich jetzt weit über das sichtbare Licht und dem nahen Infrarot bis zum thermalen Infrarot nun und dem Mikrowellen-Bereich. Passive Fernerkundungssensoren gewinnen ihre Informationen aus der von der Erde emittierten Strahlung, aktive Sensoren (z.B. Radar) erzeugen ihr eigenes elektromagnetisches Signal. In Tabelle 1 findet sich eine zusammenfassende Charakterisierung der Fernerkundungssysteme nach Ehlers (2004).

Die Verfügbarkeit von aktuellen Fernerkundungsaufnahmen für weite Gebiete der Erde hat in der letzten Jahren dramatisch zugenommen. Neue Technologien und Wissenschaftsgebiete wie Global Positioning System (GPS), Geographische Informationssysteme (GIS), digitale Photogrammetrie und multisensorale Datentechniken eröffnen neue Felder für die Anwendungen der Fernerkundung. Die neuen hoch auflösenden kommerziellen Satellitensensoren wie Ikonos der Quickbird erreichen zum ersten Mal in der Geschichte der Erdbeobachtungssatelliten eine Auflösung von 1m und besser. Mit großem Interesse verfolgen derzeit die Nutzer hoch auflösender Fernerkundungsdaten den Übergang von konventionellen photographischen Kameras hin zu digitalen Aufnahmesystemen. Mit der Verfügbarkeit von multispektralen Flugzeug-Bilddaten mit einer hohen geometrischen Genauigkeit und

einer verbesserten radiometrischen Auflösung wird ein direkter und effizienter digitaler Datenfluss mit Auflösungen im Zentimeterbereich gewährleistet. Neben diesen bereits operationellen Verfahren eröffnen abbildende Spektrometer (Hyperspektralscanner) und Radar-Sensoren weitere neuartige Anwendungsmöglichkeiten.

Tabelle 1: Taxonomie von Fernerkundungssystemen (nach Ehlers, 2004)

Taxonomy of Remote Sensing Systems							
Recording Platform	Satellite/Shuttle		Aircraft/Balloon		Stationary		
Recording Mode	Passive (Visible, Near Infrared, Thermal Infrared, Thermal Microwave)			Active (Laser, Radar)			
Recording Medium	Analog (Camera, Video)			Digital (Whiskbroom, Line Array, 2D CCD)			
Spectral Coverage	Visible/ Ultraviolet	Reflected Infrared		Thermal Infrared		Microwave	
Spectral Resolution	Panchromatic 1 Band	Multispectral 2 – 20 Bands		Hyperspectral 20 – 250 Bands		Ultraspectral > 250 Bands	
Radiometric Resolution	Low (< 6 bit)		Medium (6 – 8 bit)		High (8-12 bit)		Very High (> 12 bit)
Spatial Ground Resolution	Very Low > 250 m	Low 50 – 250 m	Medium 10 – 50 m	High 4 – 10 m	Very High 1 – 4 m	Ultra High < 1m	

2. Satellitensysteme mit hoher räumlicher Auflösung

Mit dem erfolgreichen Start des Ikonos II Sensors im September 1999 begann die Ära der hoch auflösenden Satellitensysteme für die zivile Erdbeobachtung. Während die bisherige beste räumliche Auflösung von frei verfügbaren Satellitendaten bei zirka 5 bis 6 m lag, bot der von der Firma Space Imaging hergestellte Satellit geometrische Auflösungen von zirka 1 m im panchromatischen (schwarz-weißen) beziehungsweise 4 m im multispektralen Aufnahmemodus. Damit wurde es zum ersten Mal möglich, Satellitendaten für großmaßstäbige Planungs- und Monitoringzwecke zu benutzen. Die bisher höchste räumliche Auflösung erreicht der im Jahre 2001 gestartete Satellit Quickbird II der Firma Digital Globe (s. Tabelle 2). Durch eine drehbare Kameraoptik besitzen alle aufgeführten Systeme einen faktischen Wiederholungszyklus von zwei bis drei Tagen und die Möglichkeiten für *along-track* und *across-track* Stereoaufnahmen. Durch sehr schnelle Prozessierung können extrem kurze Lieferungszeiten erreicht werden. Allerdings sind bedingt durch die hohe Auflösung nur relativ kleine Streifenbreiten erzielbar. Tabelle 2 gibt eine Übersicht über eine exemplarische Auswahl von hoch auflösenden Satellitensystemen. Abbildung 1 zeigt als Beispiel eine Quickbird-Satellitenszene des Pyramidenfeldes bei Gizeh (Ägypten) mit 70 cm Bodenauflösung.

Tabelle 2: Satellitensysteme mit hoher geometrischer Auflösung (Auswahl)

Company	Space Imaging		Digital Globe		Orbimage		Imagesat
System	Ikonos II launch 9/99		QuickBird 2 launch 11/01		OrbView-3 launch 6/03		EROS A1 launch 12/00
URL	www.spaceimaging.com		www.digitalglobe.com		www.orbimage.com		www.imagesat.com
Modus	Pan 11 bit	multispectral 11 bit	pan 11 bit	multispectral 11 bit	pan 11 bit	multispectral 11 bit	pan 11 bit
Geometric Resolution	1 m	4 m	0.61 m	2.44 m	1 m	4 m	1.8 m (hypersampling 1 m)
Spectral Resolution (nm)	525-929	445-516 (b) 506-595 (g) 632-698 (r) 767-853 (nir)	450-900	450-520 (b) 520-600 (g) 630-690 (r) 760-900 (nir)	450-900	450-520 (b) 520-600 (g) 630-690 (r) 760-900 (nir)	500-900
Scale for Applications			1 : 5 000 – 1 : 25 000				
Swath Width	11 km		16.5 km		8 km		13.5 km
Image Scene Size	11 x 11 km ²		16.5 x 16.5 km ² strip: 16.5 x 165 km ²		8 x 8 km ²		13.5 x 13.5 km ² vector scene: 13.5 x 40 km ²
Orbit Altitude	681 km		450 km		470 km		480 km
Inclination	98.1 sun synchronous		97.2 sun synchronous		97 sun synchronous		97.3 sun synchronous

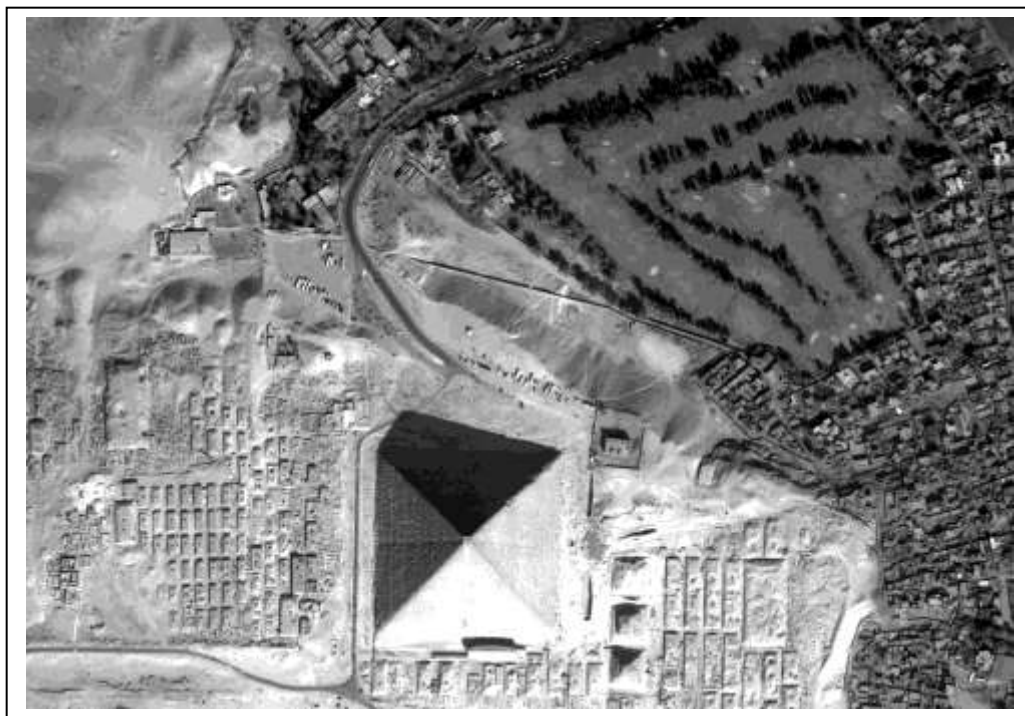


Abb. 1: Quickbird Aufnahme des Pyramidenfeldes Gizeh (Auflösung: 70 cm)

3. Flugzeuggestützte Systeme mit sehr hoher Auflösung

Nach einer langen Entwicklungsphase hat die digitale Aufnahmetechnik mittlerweile einen Stand erreicht, der zu einer langsamen aber unumkehrbaren Abwendung von analogen photogrammetrischen Messkamern geführt hat. In diesem Jahr lagen erstmals die Verkaufszahlen von digitalen photogrammetrischen Aufnahmesystemen über denen der analogen Kameras.

Zusätzlich zu den spektralen Informationen erfassen die großformatigen, digitalen Kamerasysteme (wie DMC, ADS 40, HRSC-AX oder Ultracam-D) auch stereoskopische Daten, aus denen durch automatische Matching-Algorithmen Digitale Oberflächen-Modelle abgeleitet werden können. Eine Alternative zur Akquirierung von Höhendaten stellen flugzeuggestützte Laserscanner dar, die in den letzten zehn Jahren aufgrund der gestiegenen Leistungsfähigkeit der GPS- und Inertialmesssysteme zur direkten Orientierung operationelle Reife erhalten haben. Mit der optionalen simultanen Erfassung von Laserscanning- sowie multispektralen Bilddaten (wie beim System FALCON oder den Systemkombinationen ALTM/DSS oder ALS 50/ADS 40) werden zum einen homogene Aufnahmebedingungen erzielt, zum anderen wird der Umfang ableitbarer Merkmale potenziell erhöht.



Abb. 2: Vergleich der Aufnahmesysteme von DMC (links) und ADS 40 (rechts) mit überlagerten ALK-Daten: Die zentralperspektivische Aufnahme der DMC (Pixelgröße am Boden 10 cm) weist radiale Verschiebungen auf, die beim Linienscanner ADS (Pixelgröße 25 cm) nur in Zeilenrichtung sichtbar werden (aus: Schiewe und Ehlers, 2004).

Tabelle 3 gibt einen Überblick über ausgewählte, digitale, flugzeuggestützte und bildgebende Systeme. Die meisten hiervon gehören in die Kategorie der großformatigen Geräte, lediglich das *Digital Sensor System* (DSS) weist ein mittleres Format auf. Aufgrund der gestiegenen Leistungsfähigkeit von GPS- und Inertialmess-Systemen zur direkten Orientierung haben Laserscanning-Systeme in den letzten zehn Jahren operationelle Reife erhalten. Eine detaillierte Produktübersicht gibt z.B. Lemmens (2004).

Mit der optionalen simultanen Erfassung von Laserscanning- sowie mittelformatigen, multispektralen Bild-Daten entstehen Multisensorsysteme, von denen Tabelle 4 ausgewählte Konfigurationen darstellt, die insbesondere in Europa Anwendung finden. Weitere Aussagen zu Genauigkeiten, Anwendungsmöglichkeiten und Nutzerakzeptenz finden sich bei Schiewe und Ehlers (2004).

Tabelle 3: Digitale flugzeuggestützte Aufnahmesysteme (Auswahl)

Sensor	HRSC-AX	DSS		ADS 40	UltraCam-D	DMC
Company	DLR	Applanix (Emerge)		Leica Geosystems	Vexcel Corp.	Z/I Imaging
URL	www.dlr.de	www.emergedss.com		www.gis.leica-geosystems.com/	www.vexcel.com	www.ziimaging.com
Sensor Type	Line CCD	Area CCD		Line CCD	Area CCD	Area CCD
Introduction	2000	2004		2000	2003	2002
Focal Length	151 mm	55 mm (color & CIR) 35 mm (only color)		62.7 mm	100 mm (28 mm multispectral)	120 mm (25 mm multispectral)
Field-of-view	29°	37° x 55.4°		64°	55° x 37°	74° x 44°
# CCD- Lines /- Matrix Camera	9	1		7	9	8
# CCDs across track	12 172	4077		2 x 12 000 (pan) 12 000 (ms)	11 500 (pan) 4008 (ms.)	13 824 (pan) 3 000 (msl)
# CCDs along track	-	4092		-	7 500 (pan) 2 672 (ms)	7 680 (pan) 2 000 (ms)
Sensor Size	6.5 µm	9 µm		6.5 µm	9 µm	12 µm
Radiometric Resolution	12 bit	12 bit		12 bit	> 12 bit	12 bit
Spectral Resolution (nm)	520–760 (pan) 450–510 (blue) 530–576 (green) 642–682 (red) 770–814 (NIR)	<u>RGB Modus</u> 400–500 (blue) 500–600 (green) 600–680 (red)	<u>CIR Modus</u> 510–600 (green) 600–720 (nor/NIR) 720–920 (NIR)	465–680 (pan) 428–492 (blue) 533–587 (green) 608–662 (red) 703–757 (NIR) or 833–887 (NIR opt.)	390–690 (pan) 390–470 (blue) 420–580 (green) 620–690 (red) 690–900 (NIR)	400–580 (pan) 400–580 (blue) 500–650 (green) 590–675 (red) 675–850 (NIR)
Readout Frequency	1640 lines/s	0.25 images/s		800 lines/s	0.75 images/s	0.5 images/s
Largest Application Scale	1:500	1:1,000		1:500	1:150	1:150
Stabilisation	Zeiss T-AS platform	Own platform		LH platform	Not specified	Zeiss T-AS platform
Data Recording	High speed recorded	80 GB exchangeable hard disk		MM40 mass storage	SCU (> 1 TB)	RAID disk system
Georeferencing	Applanix POS/DG with GPS and INS	Applanix POS IMU with GPS and INS		Applanix POS IMU with GPS and INS	Not specified	POS Z/I 510 navigation system with GPS and INS
Estim. Costs incl. Pos. system	-	425.000 \$		1.200.000 \$	700.000 \$	1.600.000 \$

Tabelle 4: Kombinierte Laserscanning/bildgebende Aufnahmesysteme

System	FALCON	ALTM 3033, 3070		ALS 50
Company	TopoSys	Optech		Leica Geosystems
URL	www.toposys.de	www.optech.on.ca		www.gis.leica-geosystems.com
Recording Principle	Glasfiber Array	Rotating mirror		Rotating mirror
Multiple Reflections	Max. 2 echoes	Max. 4 echoes		Max. 4 echoes
Image Sensor	Line scanner (pixel size 0.5 m)	DSS		ADS 40
(Spectral Resolution in nm)	450-490 (blue) 500-580 (green) 580-660 (red) 770-890 (NIR)	RGB Modus 400-500 (blue) 500-600 (green) 600-680 (red)	CIR Modus 510-600 (green) 600-720 (red/NIR) 720-920 (NIR)	465-680 (pan) 428-492 (blue) 533-587 (green) 608-662 (red) 703-757 (NIR) or 833-887 (NIR opt.)
Pulse Frequency	83 kHz	up to 70 kHz		up to 83 kHz
Scanning Frequency	653 Hz	70 Hz		412.33 x FOV ^{0.6548} (max. 51°)
Max. Flying Height	1600 m	3000 m		4000 m
Scan Angle (FOV)	± 7°	± 0... 25°		± 10... 37.5°
Swath Width (h=1000 m)	245 m	930 m		1530 m
Resolution	0.02 m	0.01 m		0.01 m
Vertical Accuracy	± 0.15 m	± 0.15 m (h=1200 m)		± 0.15 m ... ± 0.50 m
Horizontal Accuracy	-	± 0.50 m (h=1000 m)		± 0.15 m ... ± 0.75 m

4. Hyperspektrale Aufnahmesysteme

Passive Fernerkundungssensoren messen die von der Erdoberfläche reflektierte Sonneneinstrahlung. Dabei zeichnen sich Hyperspektralscanner oder abbildende Spektrometer durch eine sehr hohe spektrale Auflösung und eine kontinuierliche Überdeckung eines großen Wellenlängenbereichs (ca. 400 – 2500 nm) aus. Die von der Oberfläche reflektierte elektromagnetische Strahlung wird in zahlreichen, adjazenten und nicht überlappenden, schmalbandigen spektralen Kanälen (i.d.R. 10-20 nm) gemessen (s. Abb. 3). Dadurch entsteht pro Pixel eines hyperspektralen Bilddatensatzes eine sehr genaue spektrale Signatur der aufgenommenen Oberfläche mit ihrer entsprechenden Reflexionscharakteristik, die mit den im Feld oder im Labor gemessenen spektralen Signaturen anderer Oberflächen direkt verglichen werden kann. Die abbildende Spektrometrie erschließt dadurch neue Möglichkeiten für die Fernerkundung.

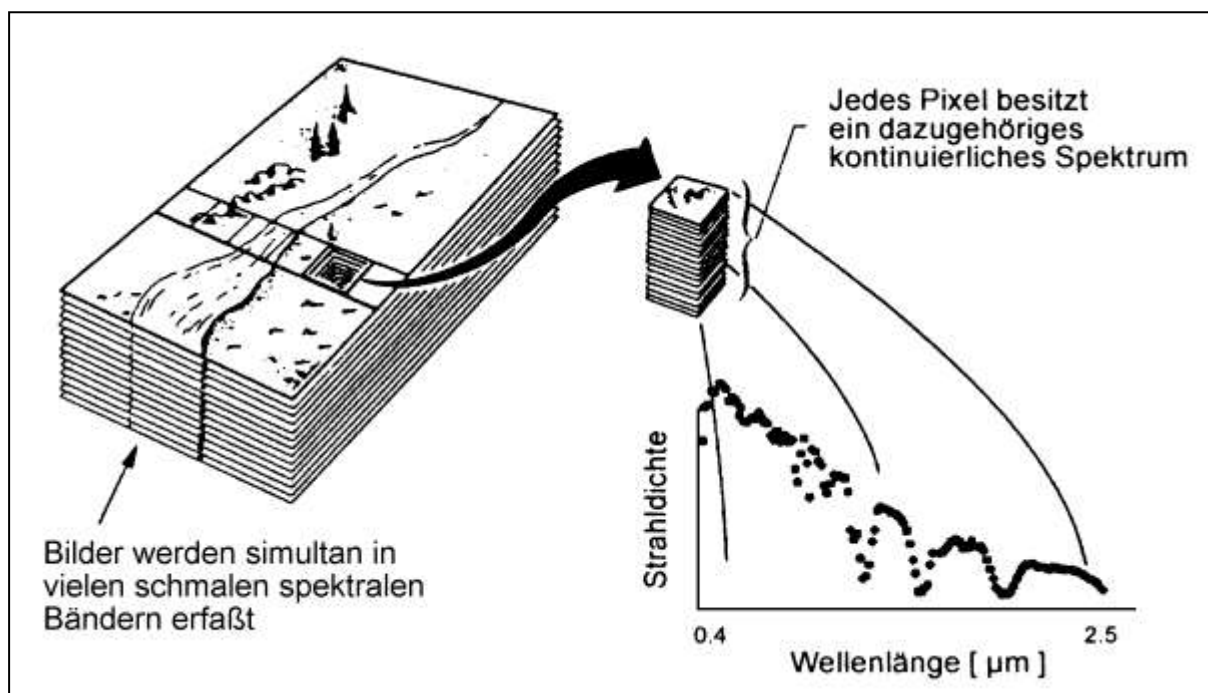


Abb. 3: Prinzip der abbildenden Spektrometrie (nach: Bach, 1995; verändert)

Tabelle 5 gibt einen Überblick über die Entwicklung hyperspektraler Sensoren, die bis zum Jahre 2000 ausschließlich flugzeuggestützt operierten.

Tabelle 5: Entwicklung der flugzeuggestützten Hyperspektralscanner (Ehlers et al., 2004)

Scanner	Betreiber	ausgewählte technische Spezifikationen	Einsatz
GER-Imaging Spectrometer Geophysical Environmental Research	GER	Whiskbroom-Scanner 3 Spektrometer, 63 Kanäle, Spektralbereich: 500 – 2500 nm	1978
AIS Airborne Imaging System	NASA JPL	Pushbroom-Scanner 128 Kanäle, Spektralbereich 1200 – 2400 nm spektrale Auflösung 9,3 nm	1982
AVIRIS Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer	NASA JPL	Whiskbroom-Scanner 4 Spektrometer 224 Kanäle, Spektralbereich: 400 – 2500 nm spektrale Auflösung 10 nm	1987
CASI Compact Airborne Spectrographic Imager	ITRES Research Instruments	Pushbroom-Scanner 288 Kanäle, Spektralbereich: 400 - 1000 nm spektrale Auflösung 1,9 nm	1989
AISA Airborne Imaging Spectrometer for Applications	Specim Ltd.	Pushbroom-Scanner 288 Kanäle, Spektralbereich: 400 - 1000 nm spektrale Auflösung 1,63 nm	1993
HYDICE Hyperspectral Digital Imagery Collection Experiment	Naval Research Laboratories	206 Kanäle, Spektralbereich: 400 – 2500 nm spektrale Auflösung 10,2 nm	1994
HYMAP Hyperspectral Mapper	Hyvista	Whiskbroom-Scanner 128 Kanäle, Spektralbereich 400 – 2500 nm spektrale Auflösung 12-16 nm	1998

Die Entwicklung satellitengestützter Hyperspektralsensoren verbessert dagegen die globale und zeitnahe Verfügbarkeit von Hyperspektraldaten. Mit Hyperion und CHRIS befinden sich bereits zwei experimentelle Forschungssatelliten im Orbit (s. Tabelle 6). Mit OrbView-4 sollte im September 2001 der erste kommerzielle satellitengestützte Hyperspektralsensor gestartet werden. Da OrbView-4 durch einen Startfehler verloren ging, sind operationelle Satellitensysteme derzeit nur in der Planung. Abb. 4 zeigt als Beispiel eines operationellen Flugzeugscanners eine Echtfarbenkombination des flugzeuggestützten Hymap-Hyperspektralscanners von Osnabrück vor der geometrischen Entzerrung.

Tabelle 6: Satellitengestützte Hyperspektralscanner

Betreiber	NASA	Orbimage	ESA
Name des Systems	Hyperion (EO-1) (11/2000)	OrbView-4 (Start fehlgeschlagen)	CHRIS (PROBA) (10/2001)
Geometrische Auflösung	30 m	8 m	25 m (50 m)
Spektrale Eigenschaften	220 Kanäle Kanalbreite: 10 nm Spektralbereich: 400 - 2500 nm	200 Kanäle Kanalbreite: 11 nm Spektralbereich: 450 - 2500 nm	38 Kanäle (117 Kanäle) Kanalbreite: 5 - 12 nm Spektralbereich: 400 - 1050 nm
Bildstreifenbreite	7,5 km	5 km	9,3 km (max. 18,6 km)
Höhe des Orbits	705 km	470 km	600 km



5. Ausblick

Die Vielzahl von multispektralen, multisensoralen und multitemporalen Fernerkundungsdaten eröffnet in Zukunft ein großes Potenzial zum Einsatz in einer Vielzahl von Anwendungen. War bisher die Verfügbarkeit von Daten ein Problem, so wird es in Zukunft ohne geeignete Auswertewerkzeuge zu einem neuartigen Problem werden, die geeigneten Daten aus der Vielzahl auszuwählen. Von der Datenarmut gerät der Nutzer in die Datenflut. Um die passenden Datensätze auszuwählen und sie in Geographische Informationssysteme zu integrieren, bedarf es neuartige automatischer Auswerteverfahren. Als Beispiele seien genannt

- Segment basierte Bildinterpretation
- Bildfusion
- Merkmalsfusion
- Automatische Informationsextraktion
- Automatische Objektmodell-Generierung.

Weiterführende Literatur

- Bach, H. (1995): Die Bestimmung hydrologischer und landwirtschaftlicher Oberflächenparameter aus hyperspektralen Fernerkundungsdaten. In: Münchener Geographische Abhandlungen, Reihe B, Band 21, Institut für Geographie der Universität München.
- Baltsavias, E.P. (1999): On the Performance of Photogrammetric Scanners. In: Fritsch, D. & Spiller, R. (Eds.): Photogrammetric Week '99, Wichmann: 155-173.
- Blanc, N. (2001): CCD versus CMOS – has CCD Imaging Come to an End? In: Fritsch, D. & Spiller, R. (Eds.): Photogrammetric Week '01, Wichmann: 131-137.
- Blaschke, T. (Ed.) (2002): Fernerkundung und GIS: Neue Sensoren – innovative Methoden, Wichmann Verlag, Heidelberg.
- Dörstel, C. (2003): DMC – Practical Experiences and Photogrammetric System Performance. In: Fritsch, D. (Ed.): Photogrammetric Week '03. Wichmann: 59-66.
- Ehlers, M. (2004): Remote Sensing for GIS Applications: New Sensors and Analysis Methods, in: Ehlers, M., H.J. Kaufmann & U. Michel (Eds.) Remote Sensing for Environmental Monitoring, GIS Applications, and Geology III, Proceedings of SPIE Vol. 5239, Bellingham, WA: 1-13.
- Ehlers, M. (2005): Urban Remote Sensing: New Developments and Trends, Proceedings, 5th International Symposium Remote Sensing of Urban Areas (URS 2005), Tempe, AZ, USA (CD proceedings), 6 pp.
- Ehlers, M., M. Gähler & R. Janowsky (2003): Automated Analysis of Ultra High Resolution Remote Sensing Data for Biotope Type Mapping: New Possibilities and Challenges, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, (57): 315-326.
- Ehlers, M. & Klonus, S. (2004): Erhalt der spektralen Charakteristika bei der Bildfusion durch FFT basierte Filterung. Photogrammetrie–Fernerkundung–Geoinformation (6): 495-506.
- Ehlers, M., A. Greiwe, M. Bochow & J. Schiewe, 2004. Auswertemethoden für die Kombination von spektral und geometrisch hochauflösenden Fernerkundungsdaten, gi-reports@fzg, Vechta, No. 2.

- Fricker, P. et al. (2000): ADS 40 – Why LH Systems Took the Three-line Road. GIM International, July 2000: 45-47.
- Gähler, M., Janowsky, R. & Schiewe, J. (2004): Automatisierte Ableitung von Biotoptypen aus räumlich höchstaufgelösten, multispektralen Bild- und Laserscanningdaten. Photogrammetrie–Fernerkundung–Geoinformation (6): 475-484.
- Greife, A., Bochow, M. & Ehlers, M. (2004): Segmentbasierte Fusion geometrisch hochaufgelöster und hyperspektraler Daten zur Verbesserung der Klassifikationsgüte am Beispiel einer urbanen Szene, Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation (6): 485-494.
- Heipke, C. (2003): Photogrammetrie & Fernerkundung – vom Elektronenmikroskop bis zur Planetenbeobachtung. Photogrammetrie–Fernerkundung–Geoinformation (3): 165-180.
- Hoffmann, A. & J.W. van der Vegt (2001): New Sensor Systems and New Classification Methods: Laser- and Digital Camera-Data Meet Object-Oriented Strategies, Geo-Information-Systeme, 6 (1): 18-23.
- Jensen, John, R. (2000): Remote Sensing of the Environment, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Katzenbeißer, R. & Kurz, S. (2004): Airborne Laser-Scanning, ein Vergleich mit terrestrischer Vermessung und Photogrammetrie. Photogrammetrie–Fernerkundung–Geoinformation (3): 179-187.
- Kraus, K. (2004): Photogrammetrie. Band 1 (7. Auflage), Verlag de Gruyter.
- Leberl, F. & Gruber, M. (2003): Flying the New Large Format Digital Aerial Camera Ultracam. In: Fritsch, D. (Ed.): Photogrammetric Week '03. Wichmann: 67-76.
- Lemmens, M. (2004): Product Survey on Airborne Laserscanners. GIM International, 5: 45-47.
- Maas, H.G. (2003): Planimetric and Height Accuracy of Airborne Laserscanner Data: User Requirements and System Performance. In: Fritsch, D. (Ed.): Photogrammetric Week '03. Wichmann: 117-125.
- Pflug, M., Rindle, P. & Katzenbeißer, R. (2004): True-Ortho-Bilder mit Laser-Scanning und multispektralem Zeilenscanner. Photogrammetrie–Fernerkundung–Geoinformation (3): 173-178.
- Schiewe, J. (2005): Status and Future Perspectives of the Application Potential of Digital Airborne Sensor Systems, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation (6): 215-228.
- Schiewe, J. & M. Ehlers (Hrsg.), 2003. Geoinformatik 03: Ausgewählte Themen der Forschungsgruppe GIS/Fernerkundung, Materialien Umweltwissenschaften Vechta (MUWV), Heft 17.
- Schiewe, J. & M. Ehlers (2004): Semantisches Potenzial digitaler flugzeuggestützter Fernerkundungssensoren, Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation (6): 463-474.
- Schiewe, J. & Ehlers, M. (2005): A Novel Method for Generating 3D City Models from High Resolution and Multi-Sensoral Remote Sensing Data, International Journal of Remote Sensing (26/4): 683-698.
- Spiller, R. (2000): DMC – Why Z/I Imaging Preferred the Matrix Approach. GIM International, July 2000: 66-68.
- Spruyt, P. & Kay, S. (2004): Quality Assessment Test with Leica Geosystems ADS40: Digital Airborne Orthoimagery. GIM International, (6): 35-37.

Bodengestützte fernerkundliche Dauerbeobachtung - Erfahrungen des Einsatzes von "LASSIE" im landwirtschaftlichen Versuchswesen -

Holger Lilienthal & Ewald Schnug

1. Einleitung

Fruchtbare Böden sind eine der wichtigsten Ressourcen auf der Erde. Viele Bearbeitungsschritte in der Pflanzenproduktion, wie zum Beispiel düngen, pflügen und säen richten sich häufig nach bestimmten Bodenparametern. Böden sind sowohl in räumlicher, als auch zeitliche Hinsicht heterogen, so dass eine einheitliche Bewirtschaftung, wie zum Beispiel eine konstante Düngemenge für den gesamten Schlag zu einem Nebeneinander von über- und unterversorgten Bereichen führen kann. Diese Praxis ist vor dem Hintergrund endlicher Ressourcen (z. B. Phosphor) ökonomisch und ökologisch nicht sinnvoll.

Mit dem Konzept der teilflächenspezifischen Landwirtschaft (Precision Farming) werden moderne Technologien und Techniken, wie zum Beispiel das Globale Positionierungssystem (GPS), geographische Informationssysteme (GIS) und Geostatistik, genutzt, um landwirtschaftliche Betriebsmittel optimiert einzusetzen. Der Einsatz und die Akzeptanz von Precision Farming hängen von vielen Faktoren wie zum Beispiel Bodenheterogenität, Feld- und Betriebsgrößen sowie die ökonomische und technologische Möglichkeiten ab (National Research Council 1997). Derzeit wird Precision Farming jedoch hauptsächlich von Betrieben mit großen Flächen und heterogenen Böden eingesetzt.

Die effiziente Bereitstellung geo-codierter Bodeninformationen ist derzeit noch ein Hindernis bei der Implementierung der Präzisionslandwirtschaft. Bodeninformation müssen in einer Dichte verfügbar sein, die die Maßstabebene der räumlichen Heterogenität widerspiegeln, damit aus diesen Informationen Bodenkarten und Handlungsanweisungen für die landwirtschaftliche Praxis (z.B. Düngapplikationskarten) erarbeitet werden können.

Die Fernerkundung ist ein leistungsfähiges Werkzeug für die Beschaffung von Informationen im regionalen Maßstab, insbesondere für Informationen bezüglich der räumlichen Heterogenität. Die meisten landwirtschaftlichen Flächen haben Perioden ohne Vegetationsbedeckung, in denen unbewachsener Boden sichtbar wird. Die Zeiträume variieren jedoch in Abhängigkeit von der Anbaufrucht und der Fruchtfolge. In Mitteleuropa findet man unbewachsene Böden im späten Herbst und frühen Frühling. Hinsichtlich der optischen Fernerkundung sind diese Zeiträume aber wegen des niedrigen Sonnenstandes ungünstig, da Schatteneffekte und geringe Energiemengen nur schwache Reflexionssignale liefern.

Unter Laborbedingungen wurden die Zusammenhänge zwischen dem Reflexionsvermögen von Böden und verschiedenen Bodenparametern, wie dem Anteil organischer Substanz des Bodens, Bodenfeuchtigkeit, Korngröße, mineralische Zusammensetzung, Eisenoxide und lösliche Salze untersucht. Die Unterschiede hinsichtlich des Reflexionssignals lassen sich im wesentlichen auf die drei Hauptfaktoren Anteil organischer Substanz, Bodentextur und Bodenfeuchte zurückführen (Panten et al. 2003). Die drei Faktoren beeinflussen sich jedoch untereinander, so dass Aussagen über die Bodenbeschaffenheit nur

auf der Grundlage von Fernerkundungsinformationen ohne vergleichende Felderhebungen nicht möglich sind.

Die Verfügbarkeit von Fernerkundungsinformationen für die Landwirtschaft ist limitiert, einerseits weil die Landwirtschaft zeitnahe Informationen benötigt, um aktuelle Maßnahmen auf der Basis von Fernerkundungsdaten ableiten zu können, andererseits liegen die Beobachtungsperioden von unbewachsenen Böden in für die Fernerkundung ungünstigen Jahreszeiten.

Am Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde der FAL wurde das bodengestützte Fernerkundungssystem LASSIE entwickelt, mit dem zeitnah Daten über die Bestandesentwicklung geliefert werden können (Lilienthal 2003). Eine kontinuierliche Beobachtung der Vegetation ermöglicht es zudem auch Informationen über den Boden abzuleiten.

2. Einflussfaktoren auf die Reflexion von Böden

Die auf den Boden einfallende solare Strahlung wird entweder vom Boden absorbiert oder reflektiert. Der reflektierte Anteil kann mit Fernerkundungssensoren aufgezeichnet werden. Die optische Fernerkundung (Wellenlängenbereich von 300 – 3000 nm) lässt nur Aussagen über die obersten Mikrometer des Bodens zu, da die Eindringtiefe des Lichtes in den Boden nur etwa die Hälfte der entsprechenden Wellenlänge beträgt. Informationen über pflanzenbaulich relevante, tiefere Bodenschichten können nicht gewonnen werden.

Mikrowellen (Radar) können in den Boden eindringen, allerdings sind die Streu- und Störmechanismen, die bei der Entstehung des gemessenen Signals wirken sehr komplex. Auf diese Technologie wird an dieser Stelle nicht weiter eingegangen.

2.1 Organische Substanz

Der Gehalt an organischer Substanz hat den stärksten Einfluss auf das Reflexionssignal von Böden, insbesondere, wenn der Gehalt 2 % überschreitet (Baumgardner et al. 1970). Bei höheren Gehalten werden die Reflexionssignaturen anderer Bodenbestandteile von der Reflexion der organischen Substanz vollständig überlagert. Allgemein führt die Zunahme des Gehaltes an organischer Substanz zu einer Abnahme (Abb. 1) der Gesamtreflexion (Baumgardner et al. 1985). Diskrete Absorptionsmerkmale konnten bisher aber nicht nachgewiesen werden (Erasmi 2002).

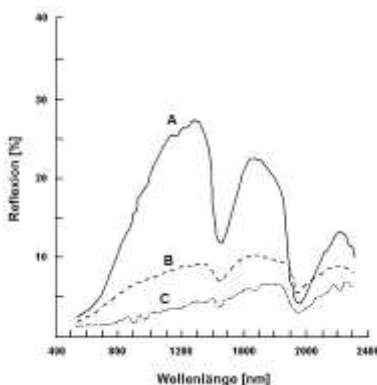


Abb. 1: Spektralkurven von drei organischen Böden.

A: gering zersetzter Torf (fibric),

B: teilweise zersetzter Torf (hemic),

C: stark zersetzter Torf (sapric)

(Baumgartner et al. 1985, verändert).

Die Bestimmung des Gehaltes an organischer Substanz ist in der Landwirtschaft eine wichtige Größe zur Planung von teilflächenspezifischen Bearbeitungsmaßnahmen, wie der Einsatz von Pflanzenschutzmitteln und die variable Düngung.

Fernerkundungsinformationen sind bisher noch nicht zur Kartierung der Variabilität der organischen Substanz für Anwendungen im Precision Farming eingesetzt worden, da weitere Faktoren wie die Bodenrauigkeit und –feuchte das Reflexionssignal stark beeinflussen (Moran et al. 1997). Auf der Basis von Reflexionsunterschieden innerhalb eines Feldes können Bodenbeprobungen durchgeführt werden, gefolgt von Laboranalysen. Danach wird es möglich Aussagen über die räumliche Variabilität eines Bodenparameters zu treffen (Pocknee et al. 1996). In einer Fallstudie von McCann et al. (1996) konnte gezeigt werden, dass auf der Basis von Fernerkundungsbildern unbewachsener Böden Management Zonen innerhalb des Schläges abgeleitet werden konnten.

2.2 Bodentextur

Im Allgemeinen nimmt die Reflexion mit abnehmender Korngröße zu. Gleichzeitig nimmt aber auch die Tiefe der Absorptionsbanden ab, das heißt die Reflexionskurve flacht über den gesamten Verlauf des sichtbaren Wellenlängenbereiches ab (BOWERS & SMITH 1972). Die Korngrößenveränderung beeinflusst die spektrale Reflexion gleichmäßig über den gesamten Wellenlängenbereich (Abb. 2). Dieses trifft aber nur für homogene Bodenarten zu. Diese Ergebnisse stammen jedoch überwiegend aus Labormessungen unter standardisierten Bedingungen. In der Natur jedoch bestehen die Böden aus Mischungen der Bodenarten, die wiederum Gefüge und Aggregate bilden. Für Aggregate gilt, dass mit Zunahme der Aggregatgröße die Reflexion abnimmt, da der Boden insgesamt rauer wird. Tonböden erscheinen dem Betrachter daher meist dunkler als Sandböden. Die Aggregatbildung wirkt sich insbesondere auf die Gesamtreflexion von Tonböden aus (ATZBERGER 1998).

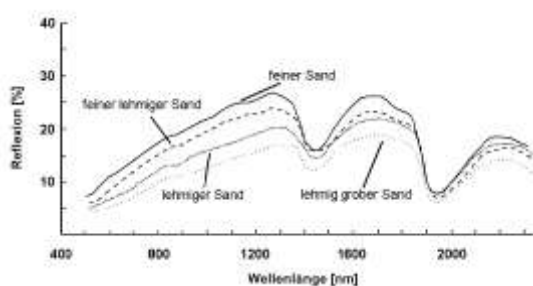


Abb. 2: Einfluss der Korngröße auf die Bodenreflexion.
(Baumgartner et al. 1985, verändert).

Witterungsverhältnisse und Bodenbearbeitung können zur Veränderung der Aggregate und somit zur Veränderung der Bodenrauigkeit beitragen. Eine erhöhte Rauigkeit führt zu einer Beschattung der Bodenpartikel, was in einer Abnahme der Gesamtreflexion resultiert (ERASMI 2002).

Die Bodentextur ist zeitlich betrachtet ein relativ konstanter Parameter (abgesehen von Verlagerungsprozessen, wie zum Beispiel Erosion). Um diesen Parameter fernerkundlich erfassen zu können werden nur einmal Referenzdaten aus dem Feld benötigt. Damit eignet sich die Fernerkundung gut zur Erhebung von Grunddaten in Kombination mit Feldmessungen, allerdings bleiben die Probleme mit der Datenverfügbarkeit (ungünstige Beleuchtungsverhältnisse in den Zeiten mit unbewachsenem Boden) bestehen.

2.3 Bodenfeuchte

Die Bodenwasserverhältnisse sind ein wichtiges Charakteristikum für die Bewertung der Variabilität der Bodenfruchtbarkeit. Die Hauptprobleme bei der fernerkundlichen Erfassung der Bodenfeuchte sind die große zeitliche Dynamik des Bodenwasserhaushaltes, sowie die Überlagerung der Reflexionssignatur durch andere Bodenparameter (organische Substanz, Textur).

Das Reflexionsvermögen von Böden nimmt mit zunehmender Bodenfeuchte ab, feuchte Böden erscheinen daher dunkler als trockene Böden (Abb. 3). Erklärt wird die Abnahme der Reflexion von trockenen zu feuchteren Böden im sichtbaren Wellenlängenbereich durch mehrfache interne Totalreflexionen innerhalb eines dünnen Wasserfilmes, um die einzelnen Bodenpartikel (Baumgardner et al. 1985).

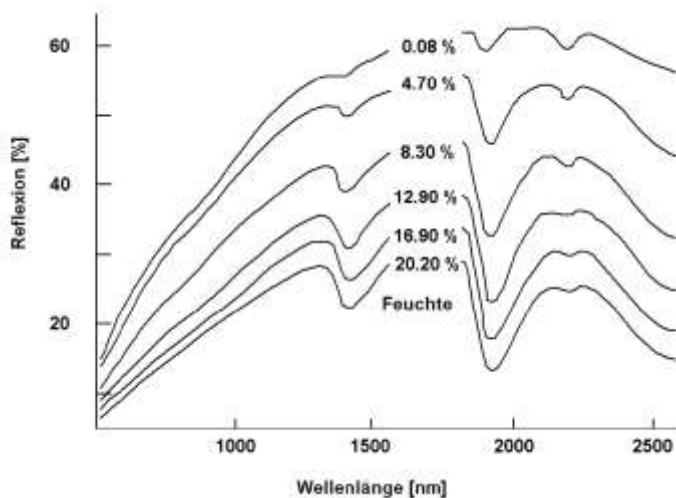


Abb. 3: Effekt der Bodenfeuchte auf die Reflexion eines schluffigen Lehms.
(Bowers & Hanks 1965, verändert).

Ein Teil der Strahlung wird nicht wieder zurück in den Raum reflektiert, sondern zwischen Wasserfilm und Bodenpartikel immer wieder hin und her reflektiert. Durch diese mehrfachen Reflexionen wird schließlich immer mehr Energie absorbiert und die Gesamtreflexion im sichtbaren Licht nimmt ab (BOWERS & SMITH 1972). Charakteristisch für die Reflexionsspektren von Böden sind die starken Absorptionsbanden bei 1450 und 1950 nm, die durch das Wasser selbst hervorgerufen werden (Abb. 3). Für die Fernerkundung im Feld spielen diese Absorptionsbanden keine Rolle, da diese durch die atmosphärischen Wasserbanden überlagert werden.

Die unterschiedlichen Bodenparameter beeinflussen die Bodenreflexion so, dass die Kombinationen verschiedener Parameter zu ähnlichen Reflexionssignaturen führen können. In Abbildung 4 sind diese Faktoren schematisch dargestellt.

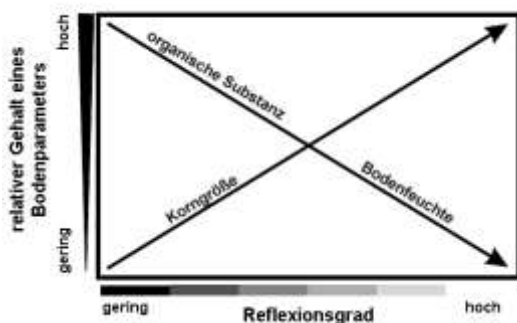


Abb. 4: Effekt wichtiger Faktoren der Bodenfruchtbarkeit auf das Reflexionsverhalten von Böden. (Panten et al. 2003, verändert).

Es ist somit nicht möglich, ohne Feldinformationen eindeutige Aussagen über die Bodenbeschaffenheit nur auf der Basis von Fernerkundungsdaten abzuleiten.

3. Fernerkundung im landwirtschaftlichen Versuchswesen

Aktuelle Bestandesinformationen sind im landwirtschaftlichen Feldversuchswesen von großem Nutzen. Die Beobachtung und Dokumentation von Freilandversuchen wird in der Regel durch zeit- und personalintensive Bonituren durchgeführt. Fernerkundungsaufnahmen können hier ein effizientes Hilfsmittel für die landwirtschaftliche Bestandesführung sein.

Die operationelle optische Fernerkundung ist derzeit aber nicht in der Lage, die Landwirtschaft zeitnah mit aktuellem Bildmaterial zu versorgen. Der Zeitverzug durch eine langwierige Datenprozessierung, für Kleinbetriebe ungünstige Datengrößen und das Problem der Bewölkung in Mitteleuropa haben bisher den Einsatz von Fernerkundung in der praktischen Landwirtschaft behindert und auf den Forschungsbereich reduziert.

3.1 Das LASSIE-System

Am Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde der FAL wurde das bodengestützte Fernerkundungssystem LASSIE (Low Altitude Stationary Surveillance Instrumental Equipment) entwickelt, mit dem zeitnahe Daten über die Bestandesentwicklung geliefert werden können (Lilienthal 2003).

Ein LASSIE ist ein stationäres rotierbares Kamerasystem, das in exponierten Positionen in der Landschaft installiert werden kann (Schnug et al. 2000).

Das Areal, das mit Hilfe eines LASSIE beobachtet werden kann, ist abhängig von der Höhe in der das Kamerasystem installiert ist (Gebäudedach, Mast oder Ähnliches). Mit dem LASSIE System können Bilder von Pflanzenbeständen und Böden in nahezu Echtzeit bereitgestellt werden. Diese Daten werden automatisch geometrisch entzerrt, auf ein Kartensystem projiziert und in ein Geographisches Informationssystem (GIS) implementiert. Veränderungen in Pflanzenbeständen können so sehr schnell erkannt werden und die Bestandesführung auf der Basis dieser Informationen angepasst werden, zum Beispiel durch gezielte Feldbegehungen und Beprobungen.

Das LASSIE System besteht aus zwei Kameras, die im sichtbaren und nahen infraroten Wellenlängenbereich empfindlich sind (Abb. 5). Die technischen Einzelheiten können der Tabelle 1 entnommen werden.

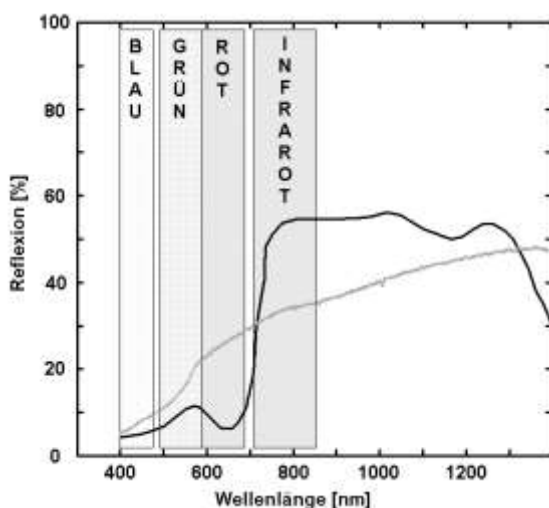


Abb. 5: Darstellung der spektralen Bandbreiten des LASSIE-System (Lilienthal 2003).

Tabelle 1: Technische Eigenschaften des LASSIE-Systems.

Sensor	LASSIE	
Kamera	JAI M90 3 x 1/3" CCD	Hitachi KP200 1 x 1/2" CCD
Physikalische Pixel Größe	6,50 µm	8,60 µm
x / y	6,25 µm	8,30 µm
Spektrale Empfindlichkeit (blau)	397 – 522 nm (λ _{max} = 456 nm)	-
Spektrale Empfindlichkeit y (grün)	461 – 646 nm (λ _{max} = 538 nm)	-
Spektrale Empfindlichkeit (rot)	539 – 729 nm (λ _{max} = 699 nm)	-
Spektrale Empfindlichkeit (nahes IR)	-	403 – 1065 nm (λ _{max} = 610 nm)
Optik	ferngesteuerter Zoom/Focus	
Brennweite	8 – 120 mm	
Instantaneous field of view (IFOV)	3,0° - 43,6°	
Filter	Hama Sky 1 B	Colour filter Type 1013
Bandbreite (b)	400 – 475 nm	-
Bandbreite (g)	490 – 588 nm	-
Bandbreite (r)	586 – 688 nm	-
Bandbreite (IR)	-	708 – 852 nm
Schwenk-,Neigekopf		
horiz. / vert.	± 180° / ± 90°	
Positionsgenauigkeit	< 0,2°	
Daten Erfassung		
Video Server	Axis 2400	
Pixel Auflösung	704 x 576	

Da das bodengestützte Fernerkundungssystem LASSIE unterhalb der Wolkendecke operiert, können bei nahezu jeder Witterung (Ausnahme Starkregen und Nebel) aktuelle Daten bereit gestellt werden. Diese Möglichkeit einer feinen zeitlichen Auflösung durch LASSIE stellt völlig neuartige Auswertungsmöglichkeiten zur Verfügung.

Herkömmliche Fernerkundungsdaten sind immer nur Momentaufnahmen, die durch technische Rahmenbedingungen (Flugbahn, Überflugszeit) vorgegeben sind. Die Satellitenfernerkundung setzt hauptsächlich sonnensynchrone Flugbahnen ein, das bedeutet, dass eine Region immer wieder zur gleichen Uhrzeit überflogen wird. Phänomene im Bestand, die einem Tagesverlauf folgen, z. B. Turgorveränderung bei Zuckerrüben zur Mittagszeit, konnten daher bisher kaum erfasst werden. Hier bieten sich mit LASSIE neue Möglichkeiten an, wie Zeitrafferaufnahmen, die Veränderungen im Bestand über einen

Zeitraum (Tag, Woche, Monat) dokumentieren. Die Erfassung dynamischer Prozesse und ihre gleichzeitige Kartierung (dynamic mapping) werden damit erstmalig möglich und versprechen ein großes Informationspotenzial, da nun aus räumlichen Strukturen Prozesse abgeleitet werden können (z. B. räumlicher Verlauf von Pflanzenkrankheiten, räumliche Muster beim Abtrocknen von Böden).

3.2 LASSIE im landwirtschaftlichen Versuchswesen

Ein besonders geeigneter Anwendungsbereich für LASSIE ist das landwirtschaftliche Versuchswesen. Im Gegensatz zum landwirtschaftlichen Betrieb steht hier nicht die Gewinn- und Ertragsmaximierung im Vordergrund, sondern die Untersuchung und der Vergleich von Wachstumsunterschieden unter veränderten Rahmenbedingungen.

Für das Versuchswesen sind dabei drei Kernfragen von Interesse:

1. Wo tritt ein Unterschied auf?
2. Wann tritt der Unterschied auf?
3. Wie entwickeln sich Unterschiede (insbesondere in sehr kurzen Zeitabständen, die die klassische Fernerkundung nicht auflösen kann)?

Die Unterschiede werden durch eine visuelle Bonitur, also die Feldbegehung und Bewertung von Wachstumsunterschieden und/oder Krankheitsausprägungen, erfasst. Diese gängige Arbeitsmethode verlangt viel Erfahrung vom Bewerter. Hier liegt aber auch ein Hauptkritikpunkt von Bonituren: Die Vergleichbarkeit zwischen Bonituren, die von mehreren Bewertern durchgeführt wurden ist nicht gegeben, da es sich um ein subjektives Verfahren handelt. Neben den räumlichen Strukturen ist die zeitliche Komponente von Bedeutung. Der Zeitpunkt, wann ein Phänomen auftritt, ist sehr schwer durch Bonituren zu erfassen, die Erfahrungen des Bewerbers spielen eine wichtige Rolle. Trotzdem kommt es vor, dass eine Bonitur zum falschen Zeitpunkt durchgeführt wird.

Pilzbefall in Getreide wird beispielsweise zu mehreren Terminen in der Vegetationsperiode bonitiert. Das Auftreten von Pilzbefall ist aber stark von der Witterung abhängig. Wird der falsche Zeitpunkt zur Bonitur gewählt, kann es vorkommen, dass der Befall zu spät erkannt wird. Andererseits kann es passieren, dass überhaupt kein Pilzbefall vorliegt, und der Bonitierter vergeblich angestrebt ist. LASSIEs können für derartige Bonituraufgaben eingesetzt werden. Das System kann wie eine herkömmliche Kamera eingesetzt werden, und bei entsprechend ausgestatteter Optik bis zur Auflösung eines Einzelblattes zoomen. Die Bonitierergebnisse werden auf eine objektive Basis gestellt und gleichzeitig bildhaft dokumentiert. Durch den Einsatz von LASSIE wird eine Standardisierung des Bonitierverfahrens erreicht.

Mit Hilfe der digitalen Bildverarbeitung können beispielsweise exakte, prozentuale Angaben über den Pilzbefall getroffen werden. Die Bonituren können auf der Basis von LASSIE Bilddaten geplant und auch für schlecht zugängliche Bereiche innerhalb eines Schlags durchgeführt werden.

Die genaue zeitliche Terminierung phänologisch wichtiger Zeitpunkte wird mit einem System wie LASSIE erstmals möglich. Zum Beispiel kann der Beginn der Abreife von Getreide oder Kartoffeln durch die hohe zeitliche Auflösung des Systems genau bestimmt werden. Ebenso lassen sich Ereignisse wie Hagelschäden oder Krankheitsbefall zeitlich und räumlich genau dokumentieren.

4. Zusammenfassung

Die fernerkundliche Beobachtung von Böden wird durch ein komplexes Reflexionsverhalten verschiedener Bodenparameter erschwert, da Kombinationen verschiedener Parameter zu ähnlichen Reflexions-signaturen führen können. Weiterhin liegen die Termine, an denen unbewachsene Böden direkt beobachtet werden können, zu fernerkundlich ungünstigen Zeiten im Frühjahr und Herbst mit niedrigen Sonnenständen.

Die Struktur des unterliegenden Bodens zeichnet sich jedoch zu einem gewissen Maße in den Pflanzenbeständen wieder ab. In der Landwirtschaft weist die Vegetation eine hohe Dynamik auf (z.B. durch Witterung, Wachstumsstadium, Krankheitsdruck). Der Einsatz von Fernerkundungsinformationen in der Landwirtschaft, insbesondere im Precision Farming, erfordert neben einer ausreichenden geometrischen auch eine hohe zeitliche Auflösung.

Die herkömmliche Fernerkundung mit Luft- und Satellitenbildern weist jedoch eine eingeschränkte Datenverfügbarkeit durch Witterung und vorgegebenen Aufnahmetermenen auf. Dynamische Prozesse, wie zum Beispiel die Reaktion von Pflanzenbeständen auf eine veränderte Wasserversorgung konnten bisher so nicht dokumentiert werden. Das LASSIE-System ermöglicht eine zeitlich hochauflösende Erfassung kleinerer Areale und damit erstmals die Erfassung dynamischer Prozesse und ihre gleichzeitige Kartierung (dynamic mapping). Damit wird es nun möglich aus räumlichen Strukturen Prozesse abzuleiten. Derzeit ist das LASSIE-System ein Prototyp der im wissenschaftlichen Bereich zum Einsatz kommt.

Eine Einschränkung beim Einsatz von LASSIE ist, dass nur ein begrenzter Bereich eines Feldes oder eines landwirtschaftlichen Betriebes erfasst werden kann. In Regionen mit geringen Höhenunterschieden kann ein Bereich von ungefähr 100 Hektar durch ein LASSIE überblickt werden (bei einer Masthöhe von 20-m). Kann nur ein begrenzter Teil eines Feldes eingesehen werden, sollte der Standort für ein LASSIE so gewählt werden, dass eine möglichst große Variationsbreite der Bodenunterschiede erfasst werden kann.

Panten (2002) hat gezeigt, dass sogenannte Monitorpedozellen für die Beschreibung von Feldheterogenität verwendet werden können. Diese Pedozellen sind Bereiche gleicher Bodeneigenschaften. Wählt man nun den Beobachtungsstandort so aus, dass möglichst viele dieser Pedozellen mit einem LASSIE beobachtet werden, können die Verhältnisse von nicht beobachteten Bereichen auf der Basis der beobachteten Zellen interpoliert werden.

Die Stärke der klassischen Fernerkundung ist die schnelle bildhafte Aufnahme größerer Regionen, bis hin zur globalen Abdeckung. Eine komplette flächendeckende Erfassung der Landschaft mit LASSIE ist nicht realistisch. Die LASSIE-Systeme sind eine Ergänzung der bestehenden Fernerkundungssensoren und sollen diese nicht ersetzen, sondern deren Anwendungsspektrum erweitern.

Literatur

Atzberger, C. (1998): Estimates of winter wheat production through remote sensing and crop growth modelling. Berlin: Verlag für Wissenschaft und Forschung 261 p, ISBN 3-89700-013-X.

Baumgardner, M.F., Kristof, S.J., Johannsen, C.J. & Zachary, A.L. (1970): Effects of organic matter on multi-spectral properties of soils. Proc. Indiana Acad. Sci. 79, 413-422.

- Baumgardner, M.F., Silva, L.F., Biehl, L.L. & Stoner, E.R. (1985): Reflectance Properties of Soils. *Advances in Agronomy* 38, pp 1-44.
- Bowers, S.A. & Hanks, R.J. (1965): Reflection of radiant energy from soils. *Soil Science* 100, 130-138.
- Bowers, S.A. & Smith, S.J. (1972): Spectrophotometric determination of soil water content. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 36, 978-980.
- Erasmi, S. (2002): Analyse spektroradiometrischer in situ Messungen als Datenquelle für die teilflächenspezifische Zustandsbeschreibung von Winterweizenbeständen. Göttingen, Deutschland, Univ., Diss. 201 p.
- Lilienthal, H. (2003): Entwicklung eines bodengestützten Fernerkundungssystems für die Landwirtschaft. Braunschweig : FAL, 180 p Landbauforsch. Völkenrode SH 254.
- McCann, B.L., Pennock, D.J., van Kessel, C. & Walley, F.L. (1996): The Development of Management Units for Site-Specific Farming. In *Precision Agriculture, Proceedings of the 3rd International Conference on Precision Agriculture*, Minneapolis, USA, June 23–26, 1996; Robert, P.C., Rust, R.H., Larson, W.E., Eds.; ASA–CSSA–SSSA: Madison, 1996.
- Moran, M.S., Inoue, Y. & Barnes, E.M. (1997): Opportunities and limitations for image-based remote sensing in precision crop management. *Remote Sens. Environ.* 1997, 61, 319–346.
- National Research Council, Board on Agriculture, Committee on Assessing Crop Yield (1997): Site-Specific Farming, Information Systems, and Research Opportunities. *Precision Agriculture in the 21st Century: Geospatial and Information Technologies in Crop Management*; National Academy Press: Washington, DC, 1997.
- Panten, K. (2002): Ein Beitrag zur Fernerkundung der räumlichen Variabilität von Boden- und Bestandesmerkmalen. *Landbauforschung Völkenrode Sonderheft* 232, 135 p.
- Panten, K., Lilienthal, H., Zillmann, E., Haneklaus, S. & Schnug, E. (2003): Remote sensing and precision agriculture. In: Lal R (ed) *Encyclopedia of soil science*. Marcel Dekker Inc. New York USA 2003. <http://www.dekker.com/servlet/product/productid/E-ESS>
- Pocknee, S., Boydell, B.C., Green, H.M., Waters, D.J. & Kvien, C.K. (1997): Directed Soil Sampling. In *Precision Agriculture, Proceedings of the 3rd International Conference on Precision Agriculture*, Minneapolis, USA, June 23–26, 1996; Robert, P.C., Rust, R.H., Larson, W.E., Eds.; ASA–CSSA–SSSA: Madison, 1996.
- Schnug, E., Haneklaus, S., Lilienthal, H. & Panten, K. (2000): LASSIE : An innovative approach for the continuous remote sensing of crops. *Asp App*

Multispektrale Sensoren zur Erfassung von Schadstoffen in Pflanzen in der biologischen Bodensanierung

Andreas Fisler & Manfred Weisensee

Einleitung

Der Boden unterliegt täglich Schädigungen durch Versiegelung, Erosion und Verunreinigung. Belastungen ergeben sich vor allem durch eine hohe Konzentration von Menschen auf begrenzter Fläche und den daraus entstehenden wirtschaftlichen Aktivitäten. Zu den besonders gefährlichen Bodenverunreinigungen zählen neben organischen Schadstoffen insbesondere Schwermetalle, welche auch durch unsachgemäße Ausbringung von Klärschlamm und anderem verunreinigtem Material großflächig auf landwirtschaftlichen Flächen vorzufinden sind. Aus Sicht des Pflanzenbaus lassen sich die Schwermetalle in Gruppen von essentiellen Stoffen (Eisen, Nickel, Zink, Kupfer, ...) und nicht essentiellen Stoffen (Blei, Cadmium, Quecksilber, ...) trennen. Viele dieser Metalle liegen als natürliche Elemente vor und sind häufig durch den industriellen Einfluss überhaupt erst oder in erhöhter Konzentration nachweisbar.

Für diese Art von Bodenbelastungen erforscht das Institut für Angewandte Photogrammetrie und Geoinformatik IAPG in einem Forschungsschwerpunkt gemeinsam mit dem Emder Institut für Umwelttechnik EUTEC zum einen Verfahren der biologischen Bodensanierung mit Hilfe von pflanzlichen Akkumulatoren, wie Raps, Mais oder anderen Kulturpflanzen und zum anderen die Möglichkeiten, einen Nachweis der Inhaltsstoffe durch hyperspektrale Sensoren direkt an der Pflanze vorzunehmen, ohne sie zu zerstören oder zu beschädigen, Fisler und Weisensee (2004).

Sensoren

Zum Nachweis von Inhaltsstoffen in Pflanzen sind Techniken der Fernerkundung mit vielen Vorteilen gegenüber chemischer Analytik einsetzbar:

- Aufnahmen bzw. Messungen sind „jederzeit“ möglich und stehen „sofort“ zur Verfügung.
- Ergebnisse sind „eindeutig“ und „einfach“ zu verarbeiten.
- Verschiedene Sensoren sind „problemlos“ zu kombinieren.
- Daten sind „kostengünstig“ zu erfassen.

Als Nachteil der Verfahren der Fernerkundung ist, insbesondere bei der Datenerfassung mittels Satelliten oder Flugzeugen, die Problematik der Aufnahmekonfiguration zu nennen, welche es erschwert, Detailinformationen qualitativer bzw. quantitativer Art zu ermitteln. Dieser Nachteil ist bei Fragestellungen zur Untersuchung weiträumiger Phänomene nicht unbedingt ausschlaggebend.

Beobachtungen an Pflanzen werden im Forschungsschwerpunkt Biologische Bodensanierung im Spektralbereich von 350 bis 1700 nm durchgeführt und finden in Aufnahmeentfernungen von höchstens einigen Zentimetern statt bei einer Auflösung von ca. 1 cm² auf dem Objekt. Basierend auf den Eigenschaften von Objekten, die im sichtbaren Bereich möglicherweise gleich erscheinen, aber bei

Wellenlängen außerhalb des sichtbaren Spektrums durchaus unterschiedliche Absorptions- und Reflexionseigenschaften haben können, lassen sich so quantitative und qualitative Aussagen über den Stoffwechsel und die Aufnahmeeigenschaften von Stoffen in den untersuchten Pflanzen machen. Die dafür eingesetzten Sensoren müssen eine hohe Genauigkeit und Zuverlässigkeit haben und zudem noch außendiensttauglich sein. Da keine Sensoren für den gesamten Bereich des in Frage kommenden elektromagnetischen Spektrums vom UV- bis zum IR-Bereich zur Verfügung stehen, müssen Sensoren für Teile dieses Spektralbereichs gekoppelt werden.

VIS-Hyperspektralscanner

Bei dem Ramses-ACC-VIS der Firma Trios handelt es sich um einen unabhängigen, kompakten Hyperspektral-Sensor im Bereich des sichtbaren Lichts. Er ist speziell für den Außeneinsatz auch unter widrigen Verhältnissen konzipiert. Das Gehäuse besteht aus Chromstahl und ist in der Grundausstattung spritzwasser- und staubgeschützt. Als OEM-Komponente ist ein Spektrometer der Firma Zeiss integriert. Die Stromversorgung kann über einen weiten Bereich von 12 V DC über 110 V AC 60 Hz bis hin zu 240 V AC 50Hz erfolgen und prädestiniert damit das Gerät für den flexiblen Outdooreinsatz. Das Gerät wird über eine externe Box gesteuert, die je nach Ausstattung auch die Datenspeicherung übernehmen kann. Der Wellenlängenbereich reicht im verwendeten Instrument von 320 nm bis 950 nm wobei ein kleiner Bereich für die Dunkelstromkalibrierung während jeder Messung genutzt werden. Zuleitungen zwischen Box und Sensor von bis zu 50 m sind möglich. Der Anschluss an eine Erfassungsplattform erfolgt über eine serielle Schnittstelle bzw. über ein Seriell-USB Konverter, der den Anschluss an USB 1.1 oder USB 2.0 ermöglicht.



Abbildung 1: Hyperspektralsensor im sichtbaren Bereich

Technische Daten:

- Outdoorgerät (Wasser- und staubgeschützt, 12V Stromversorgung)
- genormter Lichtleiteranschluss SMA (vom Gitter entkoppelt)
- Wellenlängenbereich von 320 bis 950 nm
- Spektraler Pixelabstand von 3,3 nm, 190 nutzbare Kanäle

NIR-Hyperspektralscanner

Bei NIR-Spektrometern ist es deutlich schwieriger, außendiensttaugliche und mit multiplen Versorgungsspannungen ausgestattete Systeme zu finden. Das im Einsatz befindliche Instrument, das die Voraussetzungen erfüllt, ist das GetSpec NIR1.7/128. Es handelt sich hierbei um ein temperaturstabilisiertes NIR-Spektrometer mit einem 128 Pixel Zeilen-InGaAs-Detektor. Das Spektrometer besitzt keine beweglichen oder justierbaren Teile und ist somit vollkommen wartungsfrei. Durch die 12V DC Spannungsversorgung (über Netzteil 110-240V AC) und das stabile Gehäuse ist das Gerät auch im Outdoorbereich einsetzbar. Einschränkung gibt es bezüglich Feuchtigkeit - speziell Regen, hier muss das Gerät unbedingt geschützt werden. Durch den USB Anschluss ergeben sich vielfältige Möglichkeiten, das Instrument zu betreiben.

Technische Daten:

- Outdoorgerät mit 12V Stromversorgung
- genormter Lichtleiteranschluss SMA (vom Gitter entkoppelt)
- Wellenlängenbereich von 910 bis 1700 nm
- Spektraler Pixelabstand von 6,5 nm
- keine beweglichen Teile, damit wartungsfrei
- 128 Kanäle



Abbildung 2: NIR-Spektrometer

Genauigkeitsuntersuchungen mit Holmiumoxid- und Neutralglasfiltern

Zur Absicherung der Messergebnisse mit dem beschriebenen Equipment, müssen vor dem Einsatz des VIS-Hyperspektralscanners die Genauigkeiten überprüft und die Resultate mit anderen Hyperspektralsensoren bzw. Laborphotometern verglichen werden. Als Verfahren wurde ein Standardverfahren zur Überprüfung aus der Laboranalytik gewählt.

Ein Verfahren zur Prüfung des Kalibrierungszustands des NIR-Sensors ist außerhalb eines Labors nicht möglich. Einige Firmen arbeiten nach eigenen Angaben zur Zeit an vereinfachten Verfahren zur Erfassung des Kalibrierungszustandes, Veröffentlichungen darüber sind jedoch noch nicht verfügbar.

Für den VIS-Sensor wird ein einfaches aber effektives Prüfverfahren angewandt. In einen Küvettenhalter, der mit dem VIS-Hyperspektralsensor über Lichtwellenleiter verbunden ist, werden verschiedene Küvetten mit kalibrierten Eigenschaften gemessen. Ein Filter (F1) besteht aus Holmiumoxidglas (Ho_2O_3), das auf Grund der chemischen Eigenschaften des Materials eine Reihe von schmalen Absorptions-Peaks im ultravioletten und sichtbaren Bereich aufweist. Des weiteren stehen drei Neutralglasfilter (F2 bis F4) zur Verfügung, die sich durch ihre Homogenität, Stabilität und konstante Transmission im sichtbaren Bereich auszeichnen.

Zur Vermeidung von äußeren Lichteinflüssen wurde eine geschlossene Aufnahmeconfiguration mit folgenden Bestandteilen gewählt:

- konstante Lichtquelle, HL-2000,
- Küvettenhalter,
- Trios VIS-Sensor,
- Lichtwellenleiter zur Übertragung.

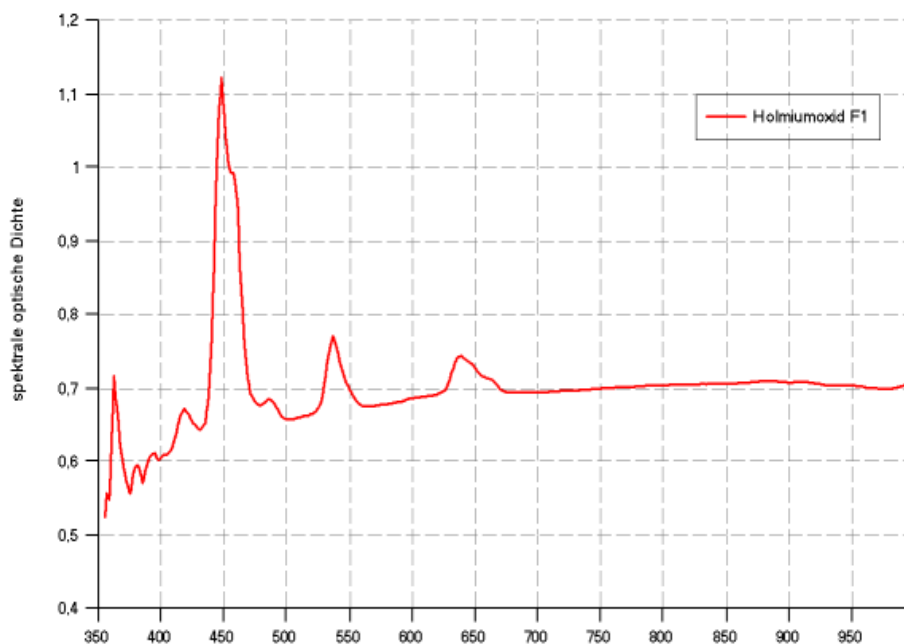


Abbildung 3: Darstellung der Ho_2O_3 Messung mit dem VIS-Sensor

In Abbildung 3 sind die Peaks einer Transmissionsmessung mit Holmiumoxid deutlich erkennbar. Die Übereinstimmung ist über den gesamten sichtbaren spektralen Bereich überzeugend und entspricht den Herstellerangaben mit einer Auflösung von 3 nm und einer Genauigkeit der Intensitätsbestimmung von unter 6 %.

Sensorfusion

Die Abdeckung einer möglichst großen spektralen Bandbreite von 360 nm bis 1700 nm in hochauflöser Form ist für den Nachweis bestimmter Schwermetalle oder Phänomene sehr wichtig, auch um ggf. eine Kanalvorauswahl für weitere Untersuchungen treffen zu können. Die beiden Sensoren (Trios RAMSES VIS 360 – 955 nm und GetSpec NIR 128L-1.7T 910 – 1700 nm) sind von unterschiedlicher Bauart und decken jeweils nur einen begrenzten Spektralbereich ab. Am Übergang vom VIS-Sensor zum NIR-Sensor überlappen sich beide Bereiche, so dass dort eine Doppelbestimmung vorliegt. Da sich die Bauart beider Sensoren vom Gitter bis zum Chip hin unterscheiden und auf Grund von Ausführbeschränkungen und restriktiver Informationspolitik der Hersteller keine detaillierten Informationen zur Verfügung stehen, die zu der Datenfusion herangezogen werden könnten, muss die Fusion ausschließlich auf den Messwerten basierend durchgeführt werden.

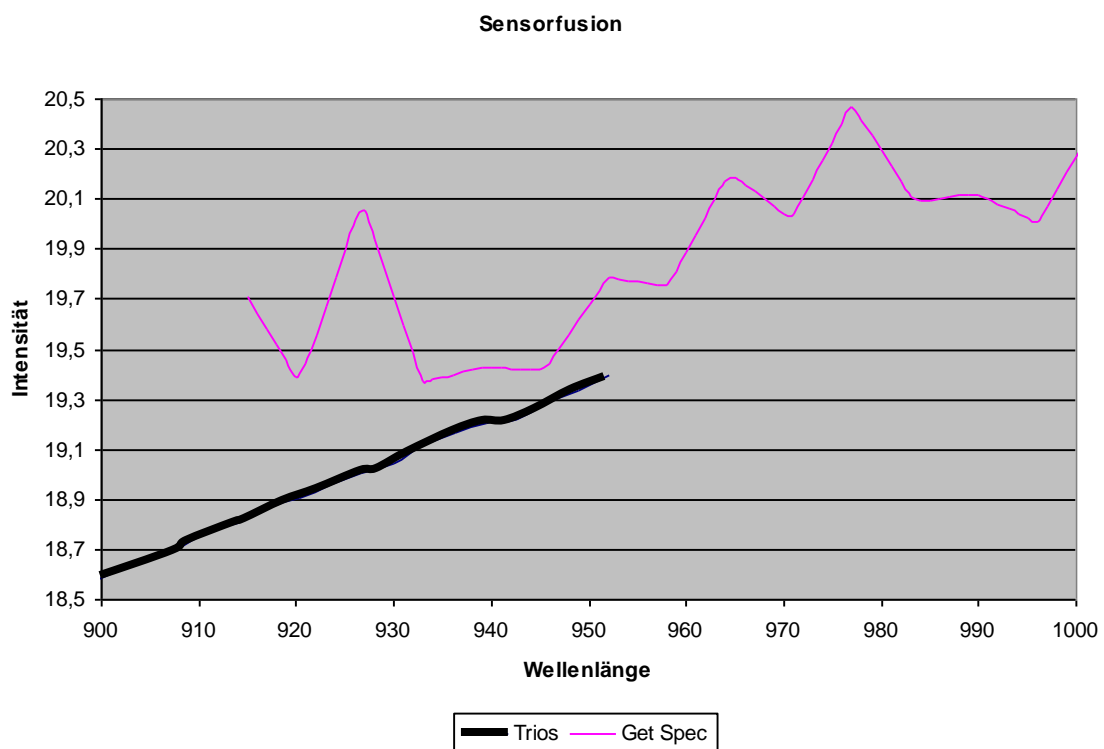


Abbildung 4: Darstellung von Messwerten im Überlappungsbereich beider Sensoren

Bei den verwendeten Sensoren, welche eine hohe und geprüfte Wiederholungsgenauigkeit und Stabilität besitzen, ist die Nutzung des gewichteten Mittels gemäß Gleichungen 1 und 2 ein geeignetes schnelles Verfahren zur Fusion zweier Einzelspektren zu einem gemeinsamen Spektrum. Beide Messwerte eines bestimmten Kanals wurden durch unabhängige Messmittel bestimmt und sollten somit nicht vernachlässigt werden.

Bestimmung des Gewichtungsfaktors:

$$\delta = \frac{p_e - p_i}{p_e - p_a}$$

Gleichung 1

δGewichtungsfaktor

p_edie Endwellenlänge des Überlappungsbereiches

p_adie Anfangswellenlänge des Überlappungsbereiches

p_idie aktuelle Wellenlänge im Überlappungsbereich

Datenfusion im Überlappungsbereich:

$$M_i = M(a)_i * \delta + M(b)_i * (1 - \delta)$$

Gleichung 2

Mangeglichene Messwert

$M(a)$...Messwert Sensor a

$M(b)$...Messwert Sensor b

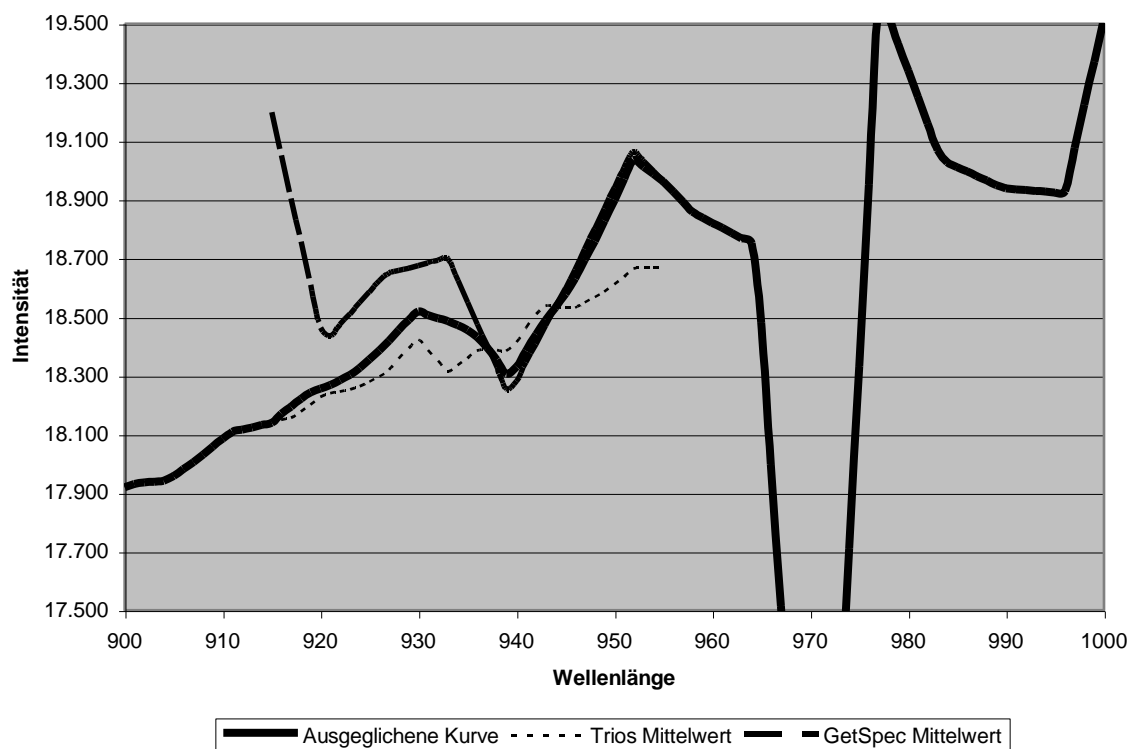


Abbildung 5: Ergebnis der Datenfusion nach Gl. 1 und 2

Erfassungskonzept mit Ergebnissen

Grundlage des Erfassungskonzeptes ist die Messung an Pflanzen vor Ort, um dort auf nicht destruktive Weise die Ergebnisse zu ermitteln. Da der Boden, die Umwelt, die Schwermetallbelastungen und viele weitere Faktoren als äußerst heterogen angenommen werden müssen, ist ein Geoinformationssystem ein adäquates Hilfsmittel, um Verteilungsmuster und räumliche Strukturen zu analysieren und zu visualisieren.

PDA mit Zusatzkomponenten

Als flexible Erfassungsplattform hat sich eine PDA-Anwendung mit verschiedenen Komponenten herauskristallisiert. Der PDA mit einer mobilen GIS Variante ausgerüstet dient zur Visualisierung und zur Navigation auf dem Versuchsfeld. Neben der eigentlichen Datenerfassung über die Hyperspektralsensoren sind zusätzlich noch weitere Komponenten integriert. Dies sind insbesondere:

- eine GPS-Antenne zur Positionierung,
- eine Digitalkamera zur Dokumentation der Erfassungsumgebung als ein Bestandteil des Qualitätsmanagements und
- die Sachdatenerfassung über alphanumerische Eingaben und akustische Speicherung.



Abbildung 6: Mobiles Erfassungssystem auf PDA-Basis

Erfassung von Blattfarbstoffen im Außendienst im Vergleich zur CHL-Laboranalytik

An Pflanzen ist eine Reihe von Parametern für das Forschungsprojekt von Interesse. Bei den „sichtbaren“ Parametern ist dies speziell Chlorophyll a und b. Die Karotinoide werden hier zunächst nicht näher betrachtet, da sie von der Größenordnung her nur einen Bruchteil der Chlorophylle ausmachen, Verdebout (1994). Letztendlich sind es jedoch die Schwermetallgehalte, welche aus den Reflexionsmessungen bestimmt werden sollen.

Die Pflanzen tragen durch den Photosyntheseprozess maßgeblich zur Erhaltung der Umwelt bei. Diese Umwandlung funktioniert aber nur dann optimal, wenn ausreichend Kohlendioxid, Wasser und Nährstoffe vorliegen. Fehlt eine Komponente lässt sich an der Chlorophyllausprägung in den Pflanzen der Gesundheitszustand und teilweise auch die Mangelerscheinungen erkennen. Chlorophyll ist der Farbstoff, mit dessen Hilfe Pflanzen Lichtenergie nutzen. Er besteht aus zwei Teilen: einem unpolaren Teil, mit dem das Chlorophyll in der Membran der Chloroplasten verankert ist, und einem komplexen polaren Teil, der wesentlich für die Blattfarbe verantwortlich ist. Chlorophyllanalysen sind normalerweise aufwendige Analysen im Labor, in welchen auf physikalischem und chemischem Wege das Chlorophyll extrahiert wird. Die Extraktion zerstört dabei aber die Pflanze, so dass keine in-vivo Ergebnisse erreicht werden können.

Die Absorptionsmaxima von Chlorophyll-a liegen bei 430 nm und 660 nm, während Chlorophyll-b Peaks bei 455 und 640 nm aufweist, Wessmann (1990). Zwischen der Messung der extrahierten Substanz und dem gebundenen Chlorophyll in einem Blatt kommt es zu einem Peak-Shift. Lichtenthaler (1987) zeigte ein Verfahren auf, das auf den Untersuchungen von Arnon (1949) basiert, und eine genaue Bestimmung der beiden Chlorophyllanteile ermöglicht. Es existiert eine Reihe von weiteren Methoden zur Chlorophyllbestimmung aus Extrakten. Bei der Betrachtung der Chlorophyllabsorption in lebenden Blättern zeigt sich, dass jenseits einer Wellenlänge von 680 nm die Absorption stark abnimmt und der Wendepunkt (Red Edge Inflection Point) ein hilfreicher Index zur Parametrisierung von Chlorophyll ist, Horler et al. (1983).

Tabelle 1: Ergebnisse der Chlorophyllbestimmung nach Lichtenthaler

Probe	CHL-a (µg/cm ²)	CHL-b (µg/cm ²)
1	34,80	15,60
2	9,16	3,39
3	33,44	14,45
4	34,37	15,09
5	29,39	10,81
6	5,34	2,31
7	3,36	1,84
8	24,23	8,45
9	1,48	0,84
10	26,22	9,01

In Tabelle 1 sind die aus Messungen mit einem Laborspektrometer berechneten Chlorophyllgehalte für 10 Proben angegeben. Dafür wurden die Werte nach dem Standardverfahren nach Lichtenthaler (1983) aus Acetonextrakt bestimmt. Für die Betrachtung von Reflexionsmessungen wird häufig die Angabe des Chlorophyllgehaltes in $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ gewählt. Die Umrechnung der Angaben von mg/ml nach $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ kann über die Eingangsblattfläche in die Acetonlösung erfolgen.

Vorläufige Ergebnisse zur Chlorophyll-Bestimmung aus Reflexionsmessungen

Die Ergebnisse basieren bisher auf einer sehr kleinen Datengrundlage. Es wurden lediglich Rapspflanzen einer Sorte untersucht, die zwar ein einheitliches Entwicklungsstadium aufwiesen, dabei wurden jedoch Unterschiede im Chlorophyllgehalt (CHL-a) von ca. 1 bis $35 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ festgestellt. Zur Bestimmung des Chlorophyllgehaltes aus Reflexionsmessungen, siehe Gleichung 3, wurden die Reflexionswerte bei 800 nm und 550 nm sowie die Eingangsblattfläche F herangezogen und statistisch getestet.

$$\text{Chl} - a (\mu\text{g} / \text{cm}^2) = -10,25 + 35,54 * \left(\frac{R_{800}}{R_{550} * F(\text{cm}^2)} \right) \quad \text{Gleichung 3}$$

Der ermittelte Wertebereich für Chlorophyll-b liegt zwischen ca. 1 und $16 \mu\text{g}/\text{cm}^2$. Hier wurden zur Bestimmung des Chlorophyllgehaltes aus Reflexionsmessungen, gemäß Gleichung 4, die Reflexionswerte bei 800 nm und 700 nm herangezogen.

$$\text{Chl} - b (\mu\text{g} / \text{cm}^2) = -3,85 + 15,43 * \left(\frac{R_{800}}{R_{700} * F(\text{cm}^2)} \right) \quad \text{Gleichung 4}$$

Schlussfolgerungen

Die Chlorophylluntersuchungen sind noch im Anfangsstadium und müssen noch auf verschiedene Weise validiert bzw. ausgeweitet werden, zu nennen sind hier:

- Verwendung weiterer Pflanzenarten und Pflanzensorten,
- Untersuchungen bei unterschiedlichem Wachstumsstand,
- Berücksichtigung inhomogener Pflanzenstrukturen und
- allgemeine Verbreiterung der Datenbasis.

Das Ziel, qualifizierte Aussagen über Schwermetallgehalte in Pflanzen aus Reflexionsmessungen abzuleiten, scheint über die indirekte Bestimmung lichtaktiver Substanzen wie Chlorophyll erreichbar. Problematisch ist jedoch die Verknüpfung mit der chemischen Laboranalytik. Für eine chemische Nassanalytik werden meist mehrere Blätter benötigt, um eine ausreichende Pflanzenmasse verfügbar zu haben. Da das entwickelte System zur Reflexionsmessung ca. 1 cm^2 Blattfläche auflöst, ist der direkte Vergleich der gemessenen Blattfläche mit der analysierten Pflanzenmasse nicht realisierbar. Entweder reduziert man durch wenig Pflanzenmaterial die Zuverlässigkeit der chemischen Analytik oder akzeptiert eine Signaturvermischung, durch Messungen an mehreren Blättern.

Dank

Die Arbeiten wurden gefördert durch die Arbeitsgruppe Innovative Projekte AGIP des Nds. Ministeriums für Wissenschaft und Kunst.

Literatur

- Fisler, A. & M. Weisensee (2004): "Management of Geo-Coded Soil Data." International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Istanbul, 2004
- Horler, D.N.H., Dockray, M. & Barber, J. (1983): „The Red Edge of Plant Leaf Reflectance“, Int. Journal Remote Sensing, 4(2).
- Lichtenthaler, H.K. (1989): „Chlorophylls and Carotenoide: Pigments of Photosynthetic Biomembranes“, Methods in Enzymology, 148.
- Verdebout, J.S., Jacquemoud, S. & Schmuck, G. (1994): „Optical Properties of Leaves: Modelling and Experimental Studies“, Imaging Spectrometry, Kluwer Academic Publishers.
- Wessmann, C.A. (1990): „Evaluation of Canopy Biochemistry“, Remote Sensing of Biosphere Functioning, Ecological Studies.

Vorstellung des Multi-Bodensensorsystems der Fachhochschule Osnabrück und Vergleichsmöglichkeiten zwischen Luftbildern und Leitfähigkeitsmessungen

Stefan Hinck, Klaus Mueller, Norbert Emeis & Olaf Christen

Einleitung

Für die praktische Landwirtschaft sind Informationen über die Verteilung der Bodenart auf den Nutzflächen von Bedeutung. Insbesondere der Tongehalt hat einen wichtigen Einfluss auf das Wasser- und Nährstoffspeichervermögen der Böden (SCHEFFER / SCHACHTSCHABEL, 1998) und ist somit für die Ertragsbildung von entscheidender Bedeutung. Doch eine entsprechende klassische kleinräumige Bodenkartierung ist kosten- und zeitaufwändig. Mit Hilfe der Sensorik kann der Kartieraufwand eingegrenzt und somit reduziert werden (DOMSCH 2004; DURLESSER 1999).

Im Forschungsprojekt „Precision Farming als Instrument der interdisziplinären potentialorientierten Landnutzung“ (kurz PIROL) der Fachhochschule Osnabrück wird im Teilprojekt Bodenkunde/Bodensensorik ein Bodensensorsystem entwickelt. Neu an diesem System ist die gleichzeitige Erfassung mehrerer Bodenparameter. Ziel des Teilprojekts ist es, Möglichkeiten einer beprobungsarmen bzw. -freien Flächenkartierung zu schaffen.

Material und Methode

Aufbau und Funktion des Sensorssystems

Das entwickelte Messsystem der Fachhochschule Osnabrück kombiniert die Messung des komplexen elektrischen Leitwerts mit weiteren Messgrößen, wie das elektrische Rauschen des Messsignals, Erfassung der Bodentemperatur und Ermittlung der Bodenfestigkeit. Die ermittelten Messdaten werden mit Hilfe von GPS-Daten georeferenziert.

An einem Rahmen sind zwei Metallplatten montiert. Diese dienen als Elektroden. Durch den Anbau des Rahmens an einen Schlepper sind dynamische Messungen möglich.

Die beiden Messplatten werden mit einer sinusförmigen Wechselspannung von 125 kHz und 2 Volt versorgt. Der Boden zwischen den Platten ist elektrisch relativ schlecht leitfähig. Dadurch stellt er eine Art schlechten Isolator (Dielektrikum) dar. Anhand des komplexen elektrischen Leitwerts werden die elektrische Leitfähigkeit des Bodens und die elektrische Kapazität der Plattenanordnung errechnet. Die elektrische Leitfähigkeit beschreibt, wie gut der Boden den Strom leitet. Die elektrische Kapazität wird von der dielektrischen Polarisierung (Ausrichtung der Moleküldipole in einem Dielektrikum) beeinflusst. Weiterhin wird ein Rauschen des Messstroms gemessen. Dieses Rauschen wird von der Qualität des Kontakts zwischen Messplatten und Boden bestimmt.

Die Bodentemperatur wird berührungslos mit einem Pyrometer (Infrarotthermometer) aufgenommen. Die Messung kann sowohl an der Bodenoberfläche als auch durch „Abschaben“ der obersten Schicht in einigen Zentimeter Tiefe erfolgen.

Die Bodenfestigkeit wird anhand der Durchbiegung eines Zinkens gemessen.

Beprobungsflächen

Zwei Versuchsflächen der Fachhochschule Osnabrück (1,6 ha; 2,4 ha) wurden im 10 m * 10 m Raster bodenkundlich kartiert. Korngrößenzusammensetzung, pH-Werte, Humus- und Nährstoffgehalte wurden nach Probennahme im Labor bestimmt. Weiterhin wurden im Feld die Bodentypen angesprochen. Die Ergebnisse der Bodenuntersuchung dienen der Überprüfung der Bodensensormessungen.

Erste Ergebnisse

Bodensensormessung

In Tabelle 1 sind die Spearmanschen Korrelationskoeffizienten zwischen den Messergebnissen und den Bodenarten sowie den organischen Kohlenstoffgehalten der Böden für die beiden Beprobungsflächen „Im Berge“ und „Wellenkamp“ dargestellt. Der Rangkorrelations-Koeffizient nach Spearman wird auf Zahlenreihen angewandt, die eine Nichtlinearität aufweisen, weiterhin wird das Ergebnis durch Ausreißer nicht stark beeinträchtigt (SACHS 2003). Insbesondere die Messergebnisse der elektrischen Kapazität sind nicht normalverteilt und zeigen eher einen nichtlinearen Verlauf.

Tabelle 1: Spearmansche Korrelationskoeffizienten (r) für Messergebnisse und Bodenart sowie organischen Kohlenstoffgehalt für die beiden Beprobungsflächen "Im Berge" und „Wellenkamp“

Fläche „Im Berge“			
Bodenart	Messgröße		
	G_mS	C_pF	Btemp_°C
Sand	-0,8 **	0,8 **	0,1
Schluff	0,7 **	-0,8 **	-0,2 **
Ton	0,8 **	-0,8 **	<0,1
C_org	0,7 **	-0,6 **	0,2 *
Fläche „Wellenkamp“			
Bodenart	Messgröße		
	G_mS	C_pF	Btemp_°C
Sand	-0,6 **	0,7 **	0,1
Schluff	0,6 **	-0,6 **	-0,1
Ton	0,6 **	-0,6 **	-0,1
C_org	0,5 **	-0,5 **	<0,1
* Korrelation ist signifikant ** Korrelation ist hoch signifikant C_org = organischer Kohlenstoffgehalt G_mS = elektrische Leitfähigkeit C_pF = elektrische Kapazität Btemp_°C = Bodentemperatur in °C			

Die Untersuchungen zeigen einen relativ deutlichen Zusammenhang zwischen der Bodenart und der elektrischen Leitfähigkeit. Das steht in Übereinstimmung mit Befunden von DOMSCH (2004). Auch die Kapazitätsmessungen lassen recht deutliche Beziehungen zu den Bodenarten erkennen. Die Bodenoberflächentemperaturmessungen zeigen dagegen keine klaren Abhängigkeiten.

Die Ursachen des elektrischen Rauschens müssen noch geklärt werden. Auffällig ist das reproduzierbare Muster des Rauschsignals an bestimmten Stellen im Feld bei Messungen, die an verschiedenen Tagen durchgeführt wurden. Das Rauschen deutet damit offensichtlich auf besondere Eigenheiten des Bodens hin.

Auf einer weiteren Versuchsfläche (Klostergarten) wurden ebenfalls Messungen durchgeführt. Anhand einer ausgewählten Messung konnte eine Korrelation von 0,5 zwischen der Bodentemperatur in 5 cm bis 8 cm Tiefe und dem Durchzugswiderstand in 20 cm Tiefe nachgewiesen werden. Der Durchzugswiderstandssensor hat in ersten Messungen seine Funktionsfähigkeit bewiesen, weitere Modifikationen sind notwendig.

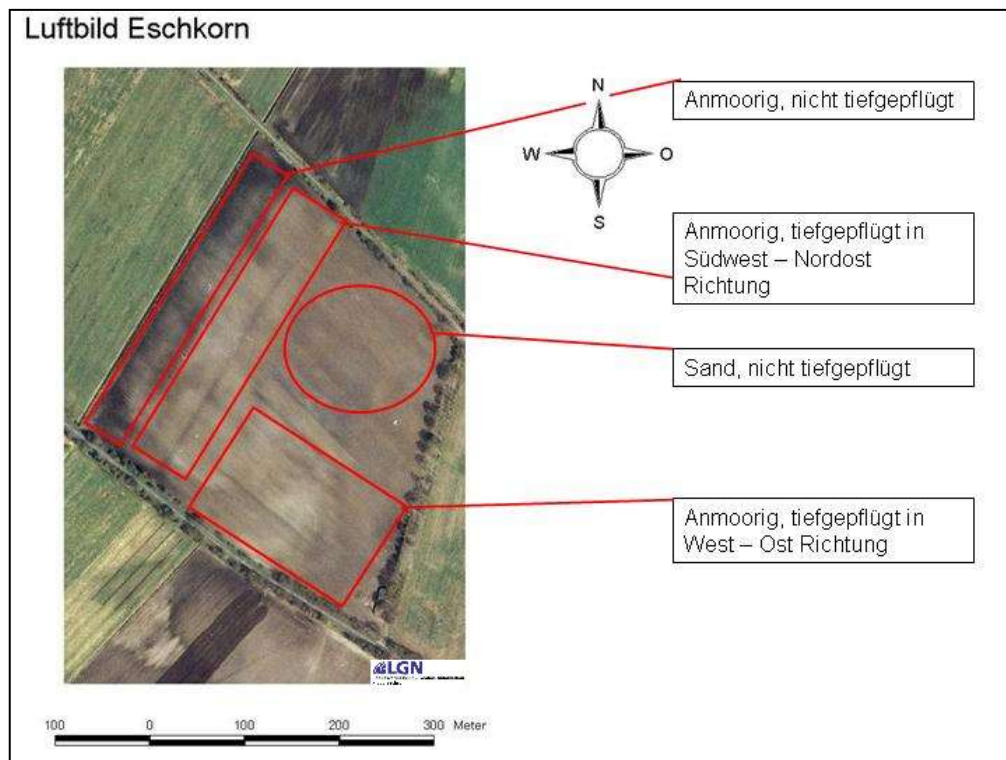


Abbildung 1: Luftbild Eschkorn; markiert sind unterschiedliche Bearbeitungsmaßnahmen auf der Fläche

Vergleich der elektrischen Leitfähigkeit einer Fläche mit einer entsprechenden Luftbilddaufnahme

An einer weiteren Fläche wird beispielhaft die elektrische Leitfähigkeit der Fläche mit der Bodenfärbung verglichen. Hierzu wurde eine übliche Luftbilddaufnahme der Fläche von der LGN (Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen) in Graustufen abgewandelt. Diese Graustufen werden mit den georeferenzierten Messwerten der elektrischen Leitfähigkeit der Fläche verrechnet und korreliert. Der Schattenwurf der am Feldrand stehenden Bäume wurde aus der Verrechnung ausgeschlossen, da dieser einen Einfluss auf das Ergebnis hat.

Bei der untersuchten Fläche Eschkorn handelt es sich um eine sandige bis anmoorige, zum Teil tiefgepflügte Fläche in der Gemarkung Ebersdorf. Deutlich sind die verschiedenen Bearbeitungsmaßnahmen zu erkennen (siehe Abbildung 1).

In Abbildung 2 ist gut zu erkennen, dass die elektrische Leitfähigkeit in den Bereichen mit einer dunkleren Bodenfärbung ansteigt. Das Bestimmtheitsmaß beträgt für die Graustufen der Bodenfärbung und elektrische Leitfähigkeit des Bodens 0,58 (siehe Abb. 3).

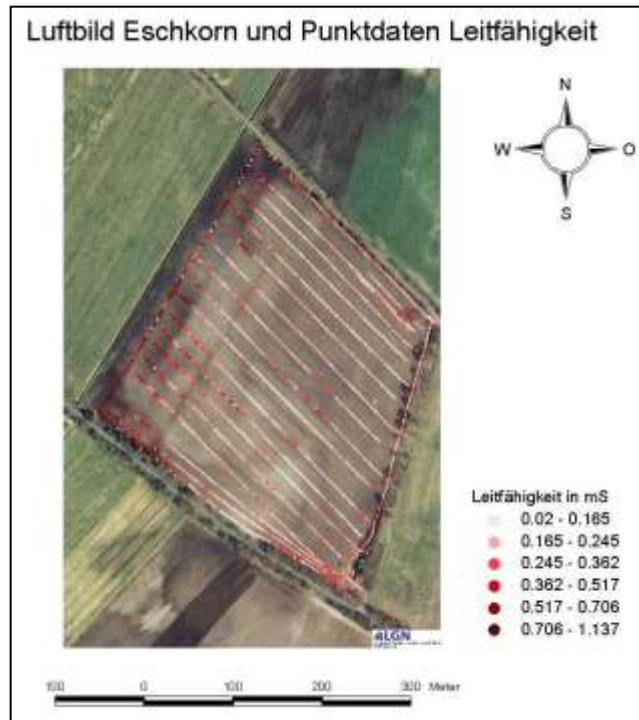


Abbildung 2: Luftbild Eschkorn aufgetragen sind die Punktdaten der Leitfähigkeitsmessung.

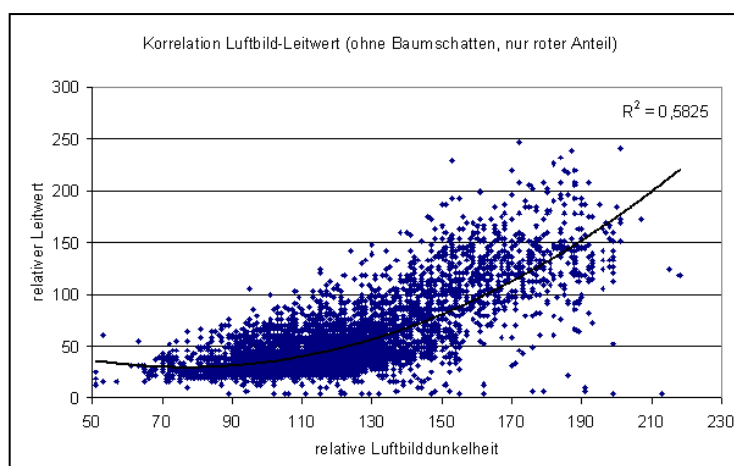


Abbildung 3: Bestimmtheitsmaß zwischen Luftbilddunkelheit (Graustufen) und Leitwert (Leitfähigkeit)

Fazit

Das Bodensensorsystem der Fachhochschule Osnabrück hat in ersten Messungen seine Funktionsfähigkeit bewiesen. Messungen auf zwei im Vorfeld aufwändig bodenkundlich kartierten Beprobungsflächen zeigen eine enge Beziehung zwischen der elektrischen Leitfähigkeit sowie der Kapazität mit der Bodenart sowie den organischen Kohlenstoffgehalten des Bodens.

Als eine weitere Möglichkeit der Auswertung von Luftbild und Leitfähigkeitsmessung wurde die Verrechnung der Graustufen der Bodenfärbung mit den Messdaten der Leitfähigkeitsmessung vorgenommen. Im angegebenen Beispiel zeigt sich ein Bestimmtheitsmaß von 0,58.

Weitere Untersuchungen werden stattfinden, um die Messdaten für eine bodenkundliche und pflanzenbauliche Interpretationen zu nutzen.

Literatur

Domsch, H. (2004): Aufnahme und Interpretation der elektrischen Bodenleitfähigkeit für eine teilflächenspezifische Bewirtschaftung, S. 11 - 20 in Arbeitsheft Boden. Hrsg.: Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, Hannover (ISSN 0949 - 1538)

Durlessen, H. (1999): Bestimmung der Variation boden-physikalischer Parameter in Raum und Zeit mit elektromagnetischen Induktionsverfahren. ISBN 3-8265-6180-5, Shaker Verlag, Stuttgart.

Sachs, L. (2003): Angewandte Statistik. Springer Verlag, Berlin.

Schachtschabel, P.; Blume, H.-P.; Brümmer, G.; Hartge, K.H. & Schwertmann, U. (1998): Lehrbuch der Bodenkunde. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, 1998.

Danksagung

Das Forschungsprojekt PIROL wird von der Volkswagen-Stiftung gefördert.

Characterization of Soil/Sediment Surfaces in the Arid and Semi-arid Zones by Means of Remote Sensing

Mohamed Mounkaila, Ludger Herrmann, Thomas Gaiser,
Thomas Maurer & Karl Stahr

1. Introduction

Dust emission from the world's arid and semi arid regions is not a recent phenomenon. Due to the fact that soil surfaces are exposed to extreme climate condition, dust particles ($\leq 0,63 \mu\text{m}$) are frequently generated and then transported by wind all over the world. Dust mineral deposits influence soil formation, terrestrial ecosystems, and the marine biosphere. In the earth atmospheric layers dust minerals play an important role in the global climate radiation balance (*Tegen et al., 1995*). Therefore, their quantification is of central interest in global climate modeling. However, models suffer from a lack of data on soil properties in the source areas and particularly in the central Sahara and Sahel. Due to the vastness of these regions and difficulties in access, it is necessary to use remote sensing to characterize and quantify the deflation surfaces.

Hypothesis: Soil surfaces can be satisfactorily characterized by means of remote sensing.

Objectives of the work:

- Determining the physical, (geo-) chemical and mineralogical properties and extension of important dust sources in the central Sahara and Sahel
- Correlating these properties with remote optical properties/reflectances
- Producing a standardized regional data set for scientific access

2. Landscape Material and Methodology

2.1 Landscape of the study areas

The present study is carried out in the Sahara and Sahel of northern Chad, since the Bodélé Depression (BD) represents the biggest dust source and is situated there. The landscape around the BD (Fig. 1) is characterized in the North by the high Tibesti mountains and the Angamma cuesta. In the North-East it is bordered by the Ennedi plateau. Between the BD and Lake Chad extends the Djourab desert. In the Northwest is the Djado plateau and in the West it is bordered by the Tenere desert.

The N-S transect extends from the north of the BD at the foot slope of the Angamma towards the Chad Lake along the Bahr El Ghazal former riverbed.

The vegetation density is low and sparse. It increases as one advances southward, due to increase in rainfall.

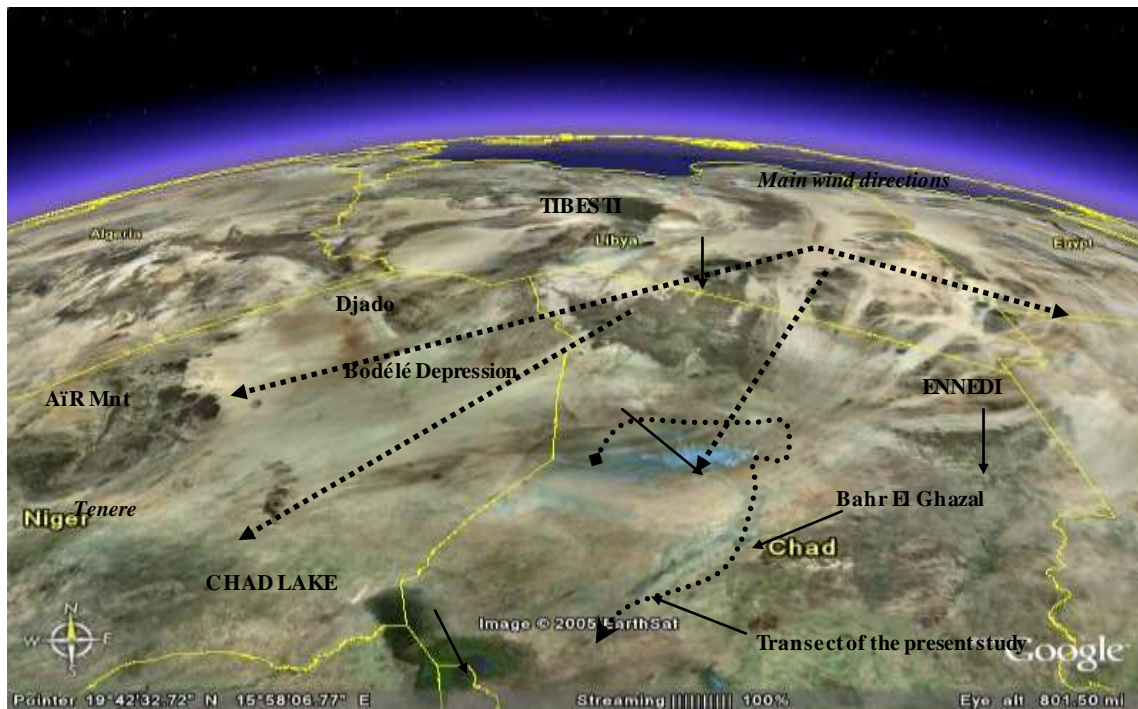


Fig 1: Aerial photography showing the landscape and transect of the study area (source Google earth 2005)

2.2 Materials and methods

Materials consist of soil/sediment surface samples collected along the transect in figure 1. Surfaces around the BD are very different. They vary from lacustrine sediments toserir (gravel) and sandy sediments. Soil surfaces were investigated on the basis of the Landsat TM 5 scenes with band combinations (RGB: 7-4-3). Thus, 70 sites representing different characteristics have been inspected and sampled for analysis in the laboratory. Spectral reflectance has been recorded in the laboratory, after soil surfaces were reconstituted comparable to on-site conditions. The methodology is summarized below:

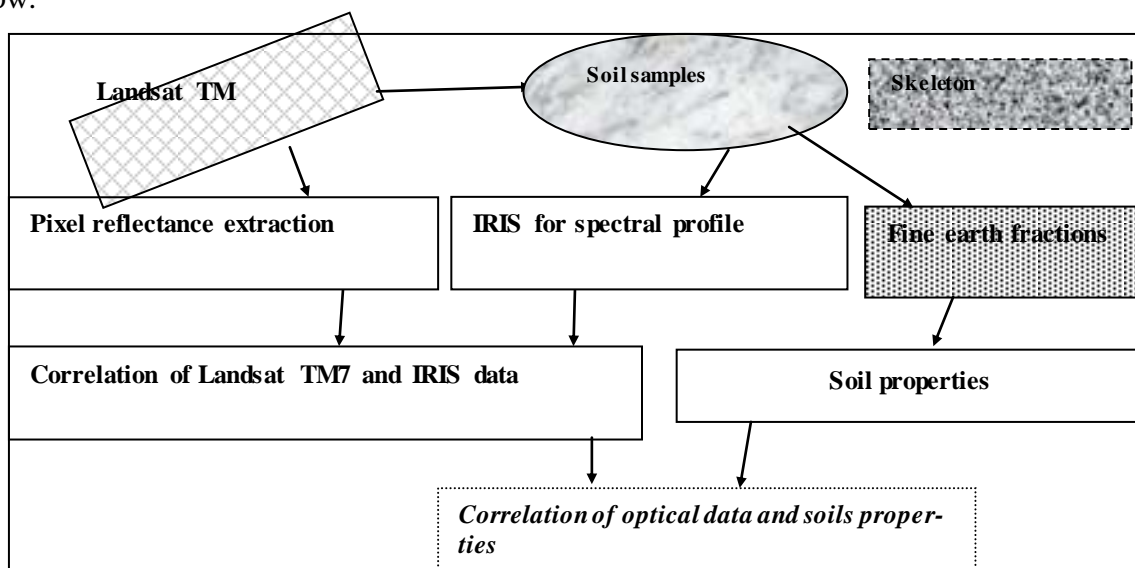


Fig 2: General methodological approach

3. Results and Discussion

Since atmospheric scientists believe that iron components play a major role for the the climatic effects of mineral dust, emphasis here is on results connected to Fe.

First results show a significant non linear correlation between the ratio of Si/Al and total iron content determined by X-ray fluorescence (Fig. 3). Si/Al is generally low in clayey samples and higher in sandy and gravelly soils. Therefore, total Fe can potentially be used for the differentiation of soil surfaces.

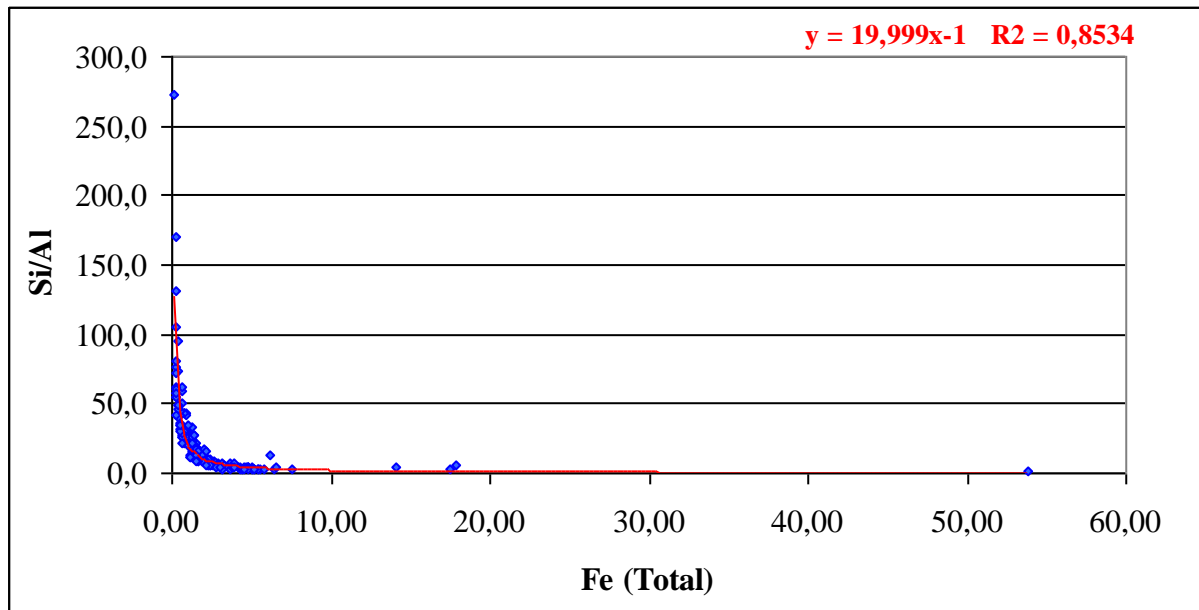


Fig 3: Correlation between Si/Al and Fe (total)

Figure 4 presents the total Ti- versus Fe-concentration. It allows to separate serif surfaces (G_1) from lacustrine sediments (G_3) and to distinguish an intermediary group (G_2). G_2 consists of gravelly soils onto which lacustrine sediments were deposited by wind.

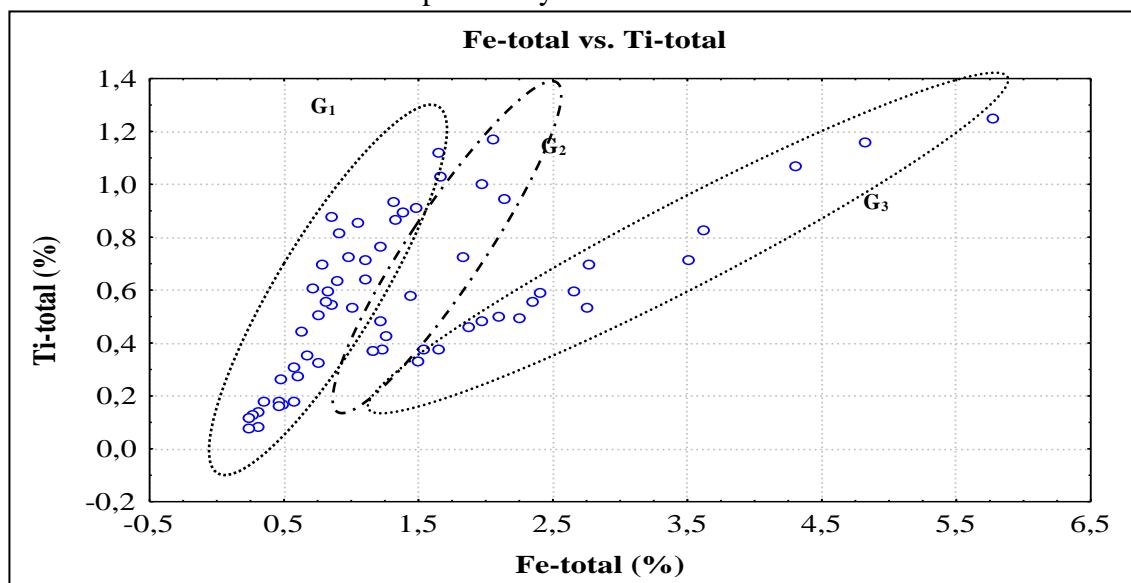


Fig. 4: Correlation between total Fe and Ti showing three groups of soil surfaces

Groups are specifically identified by means of the relative reflectance variation from 485 nm to 660 nm, respectively the S1/S3 for IRIS and B1/B3 ratio for Landsat TM7. The correlation between the ratio of S3/S1 and B3/B1 is presented in Fig 5. Low ratios ($\leq 1,6$ for S3/S1) and $\leq 1,8$ for B3/B1) correspond to G3. In contrast, G1 is characterized by higher values. Therefore, the Landsat band ratio B3/B1 allows to classify a pixel into one of the groups. For the lacustrine sediments it is possible to estimate the total Fe concentration via band combination S5-S1, and B5-B1, respectively. For both spectrometers; there is a significant linear correlation with total Fe (IRIS; $r^2 = 0,94$, Landsat; TM7; $r^2 = 0,68$). The difference in accuracy between spectrometers is due to the fact, that TM 7 pixel represent 900 m^2 . In contrast IRIS measurements were recorded on a surface of 0.25 m^2 . Another shortcoming of the chosen approach is, that the skeleton was not considered during physical, chemical and mineralogical analysis.

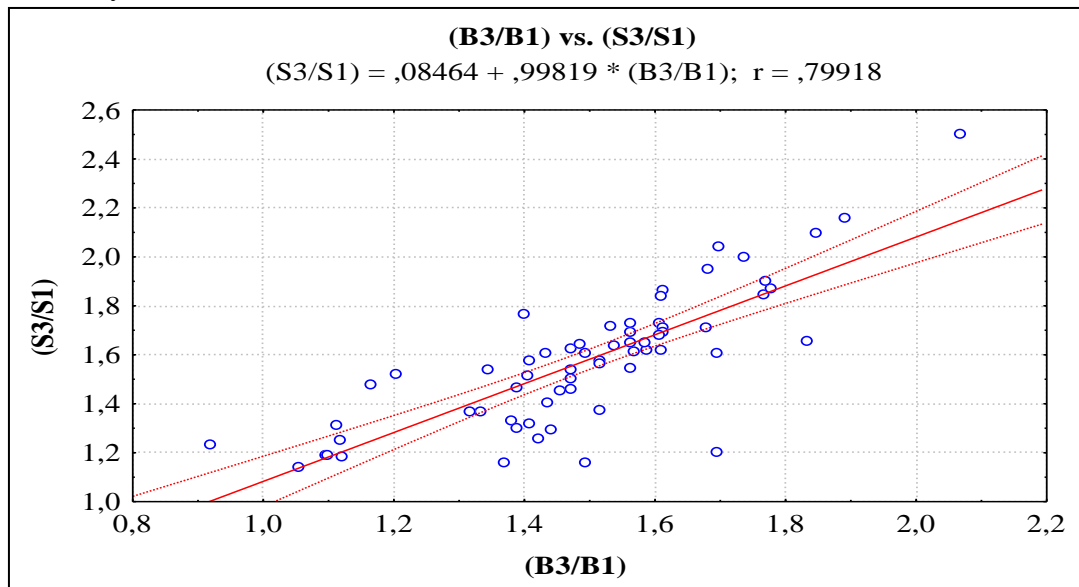


Fig. 5: Correlation between IRIS and Landsat TM 7

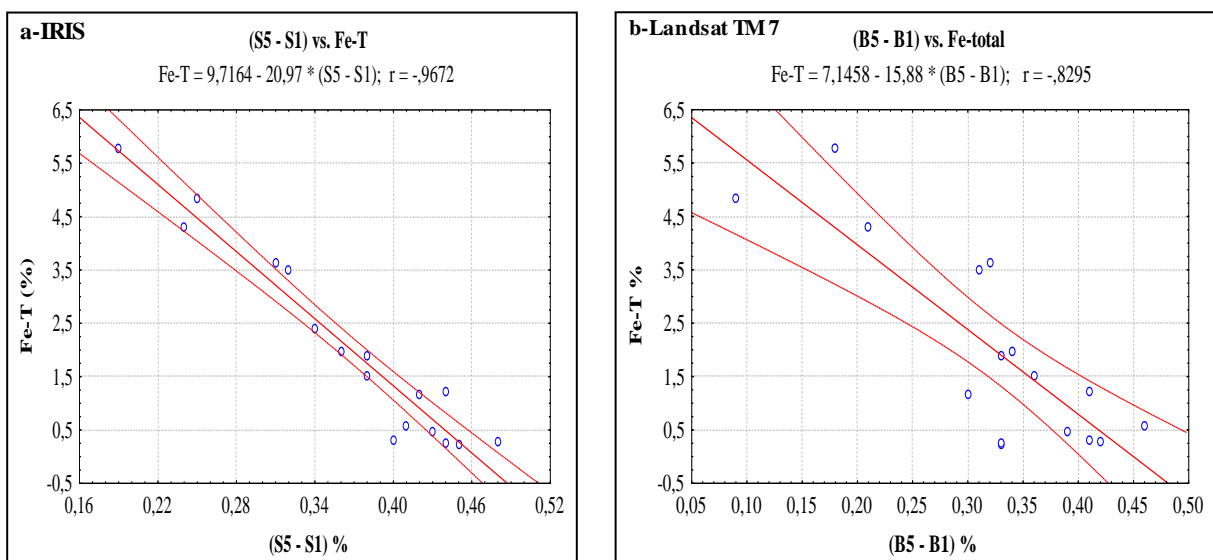


Fig. 6: Correlation between total Fe and IRIS (a) and between total Fe and Landsat TM 7 (b) for the group G₃

4. Conclusion and Outlook

The study shows that soil surfaces in the arid and semi arid regions can be characterized by means of remote sensing. The relation between total Fe and Ti allows separation of serif surfaces from lacustrine sediments, which can be identified from the Landsat TM7 images by using the ratio $B3/B1$. A high correlation exists between Fe-concentration of lacustrine sediments (G_3) and reflectance.

References

Tegen. I; Fung. I.Y. (1995). Contribution to the atmospheric mineral aerosol load from land surface modifications. Journal of Geophysical Research 99, 22897-22914.

Charakterisierung der spektralen Reflexionseigenschaften von Bodenparametern mittels Labor- und Feldspektrometrie und hyperspektralen *casi*-Flugzeugscannerdaten

Cornelia Gläßer

Zusammenfassung

Der Schutz des Bodens als integraler Bestandteil des Landschaftshaushaltes und Träger vielfältiger Funktionen gemäß Bundes-Bodenschutzgesetz erfordern die regelmäßige und flächendeckende Bereitstellung von bodenkundlichen Parametern. Konventionelle laboranalytische Verfahren erfordern stets die Extrapolation vom Punkt zur Fläche. Die Möglichkeiten und Grenzen der spektralanalytischen Verwendung unterschiedlicher Fernerkundungsdaten für die Bodenkartierung in Thüringen werden getestet

Die spektralen Reflexionseigenschaften von Böden in Mitteldeutschland sind bisher nur an ausgewählten Standorten des südöstlichen Harzvorlandes untersucht worden (Gläßer, 1988, 1992). Aus diesem Grund werden in einem ersten Schritt systematische spektrometrische Messungen unter Laborbedingungen mittels ASD im Bereich 400 – 2.500 nm an gesiebten Proben durchgeführt, um den Einfluss der bodenchemischen und bodenphysikalischen Parameter ausgewählter Löß- und Verwitterungsböden Thüringens zu untersuchen und eine Spektralbibliothek aufzubauen. In einem zweiten Schritt schließen sich die spektrometrischen Feldmessungen an. Die Spektralbibliothek wird gemeinsam mit den laboranalytischen Daten in das FIS Boden integriert.

Für die Entwicklung der Algorithmen zur Klassifikation von Fernerkundungsdaten werden Daten des hyperspektralen abbildenden Spektrometers *casi* verwendet. Dieser spektral und geometrisch hochauflösende Sensor zeichnet im Wellenlängenbereich 400 – 1.000 nm auf. Damit fehlt der mineralogisch wichtige Spektralbereich des SWIR. Die Vor- und Nachteile verschiedener hyperspektraler abbildender Scanner werden vorgestellt.

Die Algorithmenentwicklung zur Ableitung bodenschutzrelevanter Parameter konzentriert sich auf die Parameter Tongehalt, Gehalt an organischer Substanz, CaCO_3 -Gehalt und pH-Wert. Ausgehend von statistischen Zusammenhängen zwischen den spektralen Reflexionsparametern der Labormessungen unter definierten Messbedingungen und den Bodendaten erfolgt eine Datentransformation (spektrales Resampling, Standardisierung, Vektornormalisierung, Ableitung von Reflexionswerten u. a.) und darauf aufbauend eine statistische Auswertung (Berechnung des normierten Reflexionsgrades, der 1. und 2. Ableitung sowie der Hauptkomponententransformation). Die Algorithmen wurden auf die *casi*-Daten angewendet und die Ergebnisse validiert. Die Ergebnisse zeigen das Potenzial hyperspektraler Fernerkundungsdaten für die Bodenkartierung. Sehr gute Ergebnisse wurden für die flächenhafte Schätzung des Humusgehaltes erzielt (Böttcher & Gläßer, 2004). Nicht in jedem Fall sind die Ergebnisse bereits zufrieden stellend. Die Korrelationen zu Einzelparametern des Bodens sind nicht in jedem Fall optimal. Eine Erweiterung der Datenbasis wäre dringend notwendig, konnte aber in dem zeitlich eng befristeten Projekt bedauerlicherweise nicht realisiert werden. Hyperspektrale

Sensoren, die den SWIR mit einbeziehen, lassen noch bessere Ergebnisse erwarten. Erste Arbeiten hierzu wurden begonnen.

Die Arbeiten erfolgten im Wesentlichen im Thüringer Becken und wurden gemeinsam mit der Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Bodenkunde durchgeführt. Das Projekt wurde aus Mitteln des Freistaates Thüringen und der DLR (Förderkennzeichen 59EE0048) finanziert (Klitzing et al. 2004).

Literatur

- Gläßer, C. (1988): Soils in loesslandscapes of the GDR - Their spectral reflectance and photodensity in terrestrial and aerial multispectral photos. Int. Soc. Soil Science, Com. V, 5. Symp. Working Group Remote Sensing, Budapest, S. 13-16.
- Gläßer, C. (1992): Die Variabilität der Spektralcharakteristik von ausgewählten Böden.- DGPF-Jahrestagung Jena 1992, 1, Jena, S. 297-305.
- Böttcher, K., Frauendorf, J., Gläßer, C., Klitzing, A.v. & R. Bischoff (2004): Einsatz von casi-Flugzeugscannerdaten für die Bestimmung von Bodenparametern am Beispiel eines Untersuchungsgebietes in Thüringen. In: Möller, M. & H. Helbig (Hrsg.) (2004): GIS-gestützte Bewertung von Bodenfunktionen – Datengrundlagen und Lösungsansätze. Wichmann, Heidelberg, S. 91-103.
- Klitzing, A. v., Böttcher, K., Gläßer, C. & R. Bischoff (2004): Erfassung und Bewertung von Bodenheterogenitätsmerkmalen, Bodenveränderungen und ausgewählter Kriterien des Bodenschutzes mittels multitemporaler, multispektraler und multisensoraler Fernerkundungsverfahren in Agrarlandschaften. Abschlussbericht „Multipler Einsatz von Fernerkundungsdaten für die bodenkundliche Landesaufnahme und den Bodenschutz“ (FEBOSCH). TLUG, Jena, 188 S.

Einsatzgebiete und Analysemethoden der Bodenmodellierung durch hochauflösende Flugzeugscannerdaten

(Dargestellt am Beispiel abflussloser Flächen in Wasserschutzgebieten)

Martina Klärle & Sandra Lanig

1. Zusammenfassung

Der folgende Beitrag zeigt an einem konkreten Projektgebiet in Tauberfranken (Baden-Württemberg), wie auf der Basis von Flugzeug-Laserscannerdaten ein Maßnahmenkatalog zur Verbesserung der Grundwassergüte in einem Wasserschutzgebiet erarbeitet wurde. Durch die Analyse und Modellierung der Gelände- und Bodenformen werden abflusslose Flächen (Senken) selektiert und mit den Böden geringer Gründigkeit und Informationen der Geologie verschnitten. Ein aus diesem Analyseergebnis abgeleiteter Maßnahmenkatalog gibt teilflächenspezifische Vorschläge für eine Extensivierung der Bodennutzung sowie einer Neuabgrenzung der Wasserschutzgebiete mit dem Ziel der Verbesserung der Grundwassergüte.

2. Einleitung

Die Betreibergesellschaft mehrerer Wasserschutzgebiete (Grünbachgruppe) stand im Jahr 2004 vor der Herausforderung, in einem ca. 6 450 ha großen Wasserschutzgebiet die Grundwassergüte zu verbessern. An den vier Entnahmestellen war der Nitratgehalt für die Trinkwassereinspeisung deutlich über dem zulässigen Grenzwert von 50 mg/l. Zudem liegt im Plangebiet einer der größten Fruchtsäfte und Limonaden produzierenden Betriebe der Region, für den die Wasserqualität einen wesentlichen Standortfaktor darstellt. In der Konkurrenz mit anderen Standortüberlegungen war der Druck auf die Betreibergesellschaft und die Kommune zur Verbesserung der Trinkwasserqualität extrem hoch. Die Zumischung von Bodenseewasser über eine Fernleitung (Entfernung 300 km) ist eine kostenintensive und ökologisch kaum zu vertretende Lösungsvariante. Analysen und Maßnahmenkataloge auf der Basis herkömmlicher geologischer Untersuchungen brachten keine nennenswerten Verbesserungen der Grundwasserqualität. Im Folgenden wird eine Methode vorgestellt mit der, durch die Nutzung der Laserscannerdaten mit Hilfe GIS-gestützter Analyse und Bodenmodellierungen, die Grundwasserqualität nachhaltig verbessert werden kann. Die Nutzung der im Projektgebiet flächendeckend vorhandenen Laserscannerdaten liefert einen kostengünstigen Maßnahmenkatalog der zu einer Verbesserung der Wasserqualität durch geeignete Bodennutzungsrestriktionen führt.

3. Ziel

Das Ziel des Projektes ist es, auf der Basis hochgenauer Laserscannerdaten eine Situationsanalyse des Untersuchungsgebietes vorzunehmen. Die Selektion der potentiell abflusslosen Flächen über eine GIS-gestützte Modellierung der exakten Geländeform unter Berücksichtigung der Bodennutzung, der Gründigkeit und der Geologie verspricht einen neuartigen Methodenansatz für den Boden- und Grundwasserschutz.

4. Rahmenbedingungen

Die Nitratgehalte im Grundwasser des Untersuchungsgebietes lagen Mitte der 90er Jahre, bei den vier Entnahmestellen zwischen 55 und 70 mg/l. Nach der Trinkwasserverordnung (TrinkwV 2001, § 6) liegt der maximal zulässige Grenzwert bei 50 mg/l. Die Mitte der 90er Jahre begonnenen Nitratsanierungsmaßnahmen zeigten keine signifikante Verbesserung der Wasserqualität. Hauptverursacher der Nitratbelastung ist die Landwirtschaft und die damit einhergehende Ausbringung von Gülle.

Für die im Untersuchungsgebiet vorliegenden Problemfelder gelten folgende Rahmenbedingungen, die mit Hilfe der Laserscannerdaten lokalisiert werden können:

- abflusslose Flächen führen in Karstgebieten zu einem direkten Eintrag der Schadstoffe in das Grundwasser
- geringe Gründigkeit verringert das Puffervolumen des Bodens
- anstehender Oberer Muschelkalk führt die Schadstoffe über den Grundwasserleiter direkt zur Quelfassung
- intensiv genutzte Ackerflächen mit hoher Neigung führen durch das Erosionsverhalten zu weiteren Schadstoffaustragungen.

5. Datengrundlage

Die Vorteile des Laserscannens liegen vor allem in der hohen Messpunktdichte. Dadurch können sehr kleinräumige Analysen über ein großes Untersuchungsgebiet vorgenommen werden. Allerdings entstehen durch den hohen Automatisierungsgrad große Datenmengen, die durch klassische GIS nur schwer gehandhabt werden können. Zudem können aufgrund der Geomorphologie und der Vegetation Verfälschungen bei der Klassifikation der Punktwolken entstehen. Kritisch sind besonders Täler mit dichter Strauchvegetation, da in diesen Bereichen die Datenerfassung stark beeinträchtigt ist und andererseits für die Filterung der Laserpunkte in der Vegetation keine guten Voraussetzungen gegeben sind.

Verfügbarkeit:

¹Flugzeuggetragene Laserscannerdaten sind inzwischen in allen Bundesländern verfügbar. Einige Landesvermessungsämter, so auch das LVA-Baden-Württemberg in Stuttgart, bieten zumindest die Rohdaten der Befliegung flächendeckend für das gesamte Bundesland an. Höhendaten aus der sehr zeitintensiven Überarbeitung der Rohdaten zu einem engmaschigen digitalen Geländemodell, stehen jedoch in den wenigsten Fällen zur Verfügung. Aufgrund des vollautomatischen Messungsprozesses eignet sich dieses Verfahren besonders zur Erfassung großflächiger Gebiete.

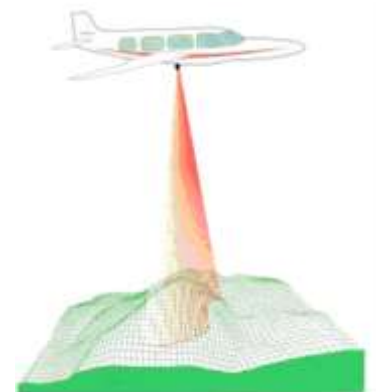


Abb. 1:
Laseraufnahmeprinzip

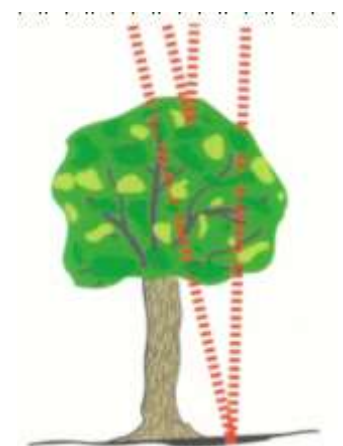


Abb. 2:
First- und Lastpulse

¹ Grafiken, Quelle: Wever, Lindenberger,

Messmethode:

Die Datenerfassung erfolgt mittels eines Laserscanners, der die Objekt- bzw. Geländeoberfläche abtastet. In regelmäßigen Abständen werden von einem Flugzeug Laserimpulse ausgesendet. Der von den Oberflächen der Objekte reflektierte Anteil des Laserstrahls wird durch den Laserscanner registriert. Durch die Laufzeitmessungen von Laserimpulsen und der Bestimmung der äußeren Orientierung des Sensors über GPS/INS-Navigationssysteme werden direkt dreidimensionale Koordinaten von Punkten auf der Erdoberfläche ermittelt. Durch Mehrfachreflexion der Lichtimpulse kann die Punktwolke in Boden- und Höhenpunkte („first pulse“, „last pulse“,) klassifiziert werden. Die Distanzmessung zwischen Flugzeug und Objektoberfläche erfolgt in der Praxis fast ausschließlich durch das so genannte Pulse-Laufzeit-Verfahren. Anhand dieser Messung und der daraus resultierenden Zeitcharakteristik des empfangenen Messsignals erfolgt die Filterung der Daten in Bodenpunkte und Höhenpunkte.

Kosten, Bearbeitungsstufen:

Unter Berücksichtigung der Genauigkeit und der Punktdichte handelt es sich bei den Laserscannerdaten um äußerst günstige Geobasisdaten. Das Landesvermessungsamt Baden Württemberg bietet die Laserscannerdaten in mehreren Bearbeitungsstufen an. Beginnend bei den Original-Messdaten, ohne jegliche Korrektur und Transformation bis hin zum interpolierten Digitalen Geländemodell im 1m-Raster des Gauß-Krüger-Koordinatensystems, die von möglichen Störwerten einer diffusen Reflexion bereits bereinigt wurden. Die Kosten für die Rohdaten belaufen sich im Projektgebiet je nach Bearbeitungsstand auf 10-60 € pro km².

Der nachfolgende Datenauszug zeigt exemplarisch fünf Messpunkte eines Flugzeuglaserscanners des Projektgebiets im Gauß-Krüger-Meridianstreifensystem und in Meter über Normal Null (müNN)

Die Daten werden im ASCII-Format bereitgestellt:

X-Werte	Y-Werte	Höhen-Werte
3550000.22	5501000.62	312.55
3550001.40	5501000.49	312.43
3550003.38	5501000.69	311.86
3550004.56	5501000.27	312.05
3550006.24	5501000.78	312.11

Die Datengrundlage für die Analyse der Gelände- und Bodenformen im Untersuchungsgebiet bilden Punkte mit transformierten Höhen über NN. Die Abbildung der Geländeoberfläche erfolgt durch unregelmäßig verteilte Laserscannerpunkte der „first pulse“ und „last pulse“ Messung. Der mittlere Punktabstand beträgt im Plangebiet ca. 1, 5 m. Die einzelnen Laserscanpunkte bestehen aus dreidimensionalen Koordinatenwerte im Gauß-Krüger-Meridianstreifensystem. Geliefert werden die Daten in gitterparallelen Kacheln von 1 x 1 km².

Genauigkeit, Punktdichte:

Die maximale Punktdichte liegt bei vier Punkten pro m² mit einer Höhengenaugkeit von ca. +/- 0, 1 m. Die Genauigkeit der Koordinaten wird durch verschiedene Fehlerquellen beeinflusst, wie z.B. die Distanzmessung selbst, die Lagebestimmung über GPS, die Richtungsbestimmung des Laserstrahls und die

Zeitsynchronisation. Bei einer Befliegung in mehreren Streifen kommt es zu einer Überlagerung und einer Verdoppelung der Punktdichte in den Überlagerungsstreifen.

Das unterschiedliche Reflexionsverhalten in Abhängigkeit des Bewuchses und der Oberflächenbeschaffenheit zeigen die folgenden Dichtebilder. Unter Dichtebild wird ein Abbild der Punktdichte der reflektierten Laserstrahlen verstanden. Das nachfolgend aufgezeigte Dichtebild eines Kernstadtbereiches zeigt das starke Reflexionsverhalten in den Gebäudeflächen. Das jeweils nebenstehende Ortholuftbild der gleichen Fläche zeigt, wie stark sich das Reflexionsverhalten in den mit Vegetation bestückten Bereichen verändert. Die unten stehende Abbildung eines Waldbereiches, mit nebenstehendem Luftbild verdeutlicht, mit wie viel weniger Messpunkte im Wald- und Grünflächenbereich zu rechnen ist.

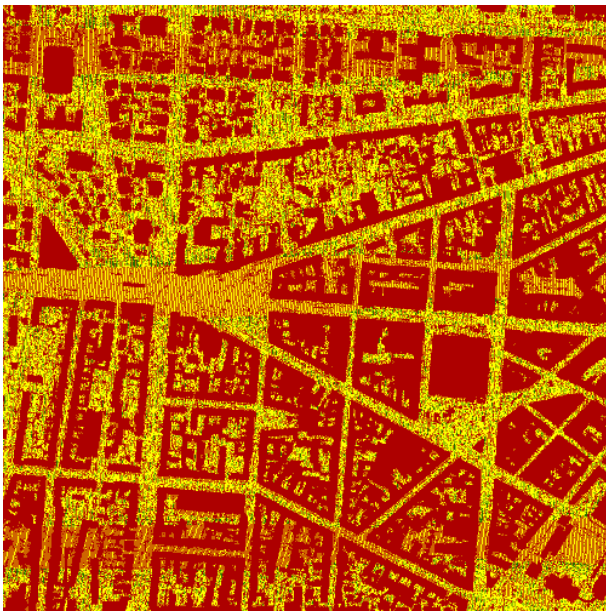


Abb. 3: Laserscanner-Dichtebild Kernstadt



Abb. 4: Luftbild Kernstadt

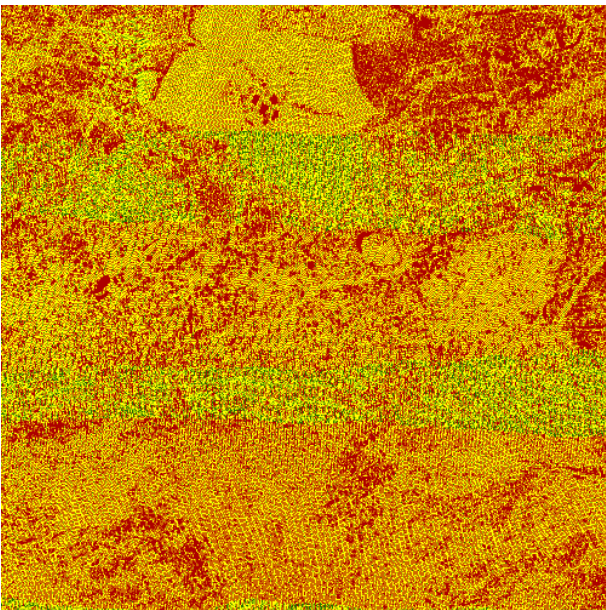


Abb. 5: Laserscanningdaten über Wald

Grafiken: Landesvermessungsamt Baden-Württemberg

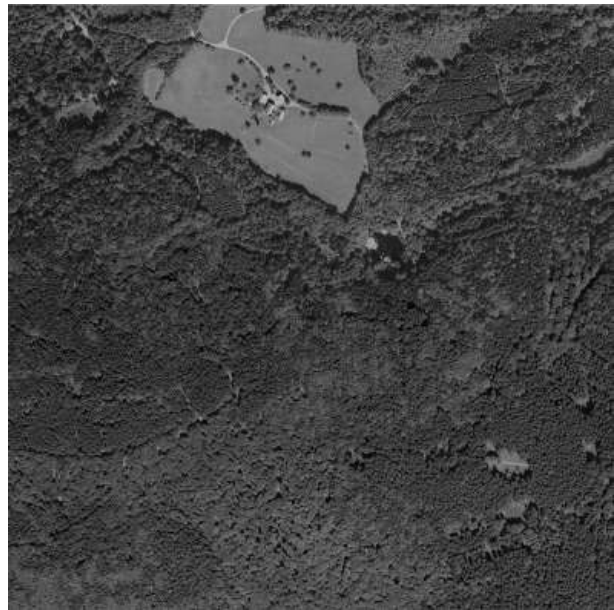


Abb. 6: Luftbild über Wald

6. Datenmodellierung und Aufbereitung

Ziel der Datenmodellierung ist die Selektion der abflusslosen Senken. Diese werden zu polygonalen Flächen umgewandelt, um sie anschließend mit den Grundwasserrelevanten Bodendaten zu verschneiden. Für die Bearbeitung der Laserscannerdaten wurde das Softwareprodukt ArcGIS 9.0 mit den Erweiterungen 'Spatial Analyst' und '3D Analyst' aus dem Haus ESRI eingesetzt.

Um die Analysen auf Grundlage der Laserscannerdaten durchführen zu können, wurden die Daten aufbereitet. Zur Erstellung des DGMs standen transformierte Rohdaten zur Verfügung. Aus diesen Daten wurde mit dem 3D Analyst eine Dreiecksvermaschung (TIN) erstellt. Im Anschluss daran konnte ein Raster-DGM in verschiedenen Auflösungen generiert werden.

Um aus dem DGM die für das Untersuchungsgebiet nötigen Maßnahmen für die einzelnen Problemfelder in Abhängigkeit der bodenbedingten Standortunterschiede ermitteln zu können, ist zunächst die Frage zu beantworten, welche Mindestfläche eine Senke aufweisen sollte, um eine im Kontext des Projekts signifikante Aussage treffen zu können.

Mehrere Szenarien von 1m bis zu 50m Mindestgrößen wurden modelliert. Nach einem Vergleich mit den Trainingsgebieten erweisen sich Mindestgrößen von 5 m, 10 m oder 20 m bei einer Höhengenaugkeit von $\pm 0,15$ m als sinnvoll um signifikante Beziehungen zwischen dem Relief, dem Boden und dessen Gründigkeit, aber auch der darunter liegenden Geologie zu treffen.

Um die potentiellen abflusslosen Flächen aus dem DGM extrahieren zu können, muss über die Arc-Toolbox und den hydrologischen Funktionen des 'Spatial Analyst' für jede Rasterzelle des Raster-DGM die Fließrichtung („flow direction“) berechnet werden. Das Ergebnistraster spiegelt die Fließrichtung jeder Zelle wieder.

Der Wert einer Rasterzelle repräsentiert die Richtung der steilsten Hangneigung. Daraus resultieren acht mögliche Fließrichtungen. Geht man von der zentralen Zelle aus und besitzt die rechts daneben liegende Zelle die steilste Neigung, so erhält diese Zelle den Wert Eins.

32	64	128
16		1
8	4	2

Aus dem sich ergebenden Fließrichtungsraster können nun die Senken („sink“) extrahiert werden. Ein „sink“ stellt eine Rasterzelle mit undefinierten Abflussrichtung dar. Der „sink“ – Befehl ermöglicht es, ein Raster-DGM zu berechnen, welches alle Senken identifiziert. Im Ausgaberraster wird eine Senke durch einen ganzzahligen Wert („integer grid“) dargestellt. Die Senken werden zwischen 1 und der Anzahl der Senken durchnummeriert.

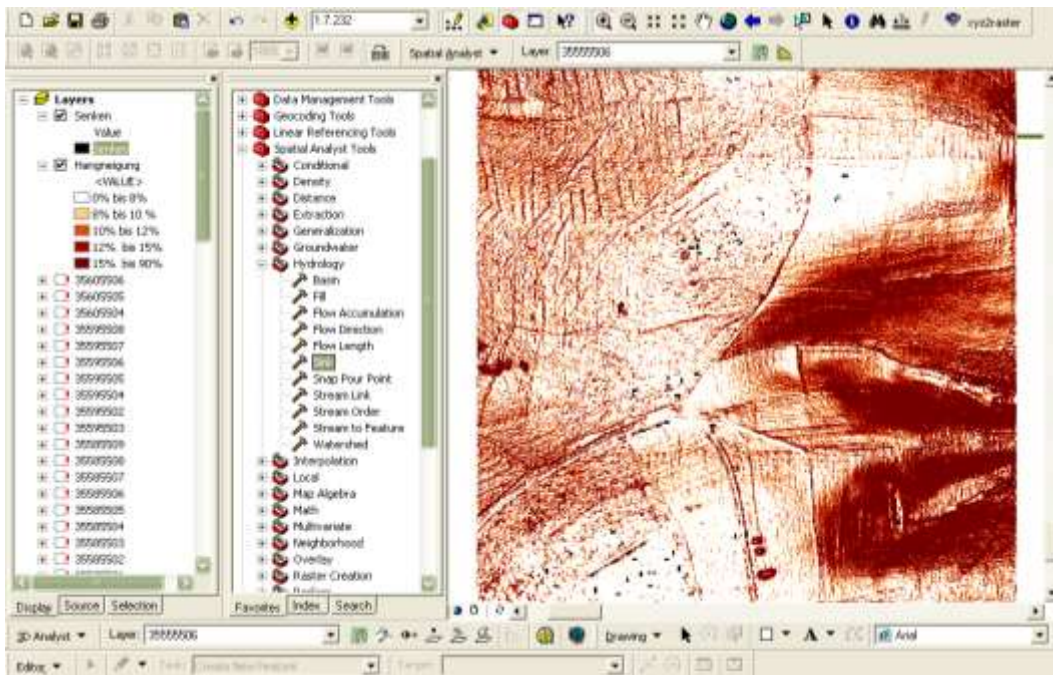


Abb. 7: Screenshot, Abfluss- und Senkenmodellierung

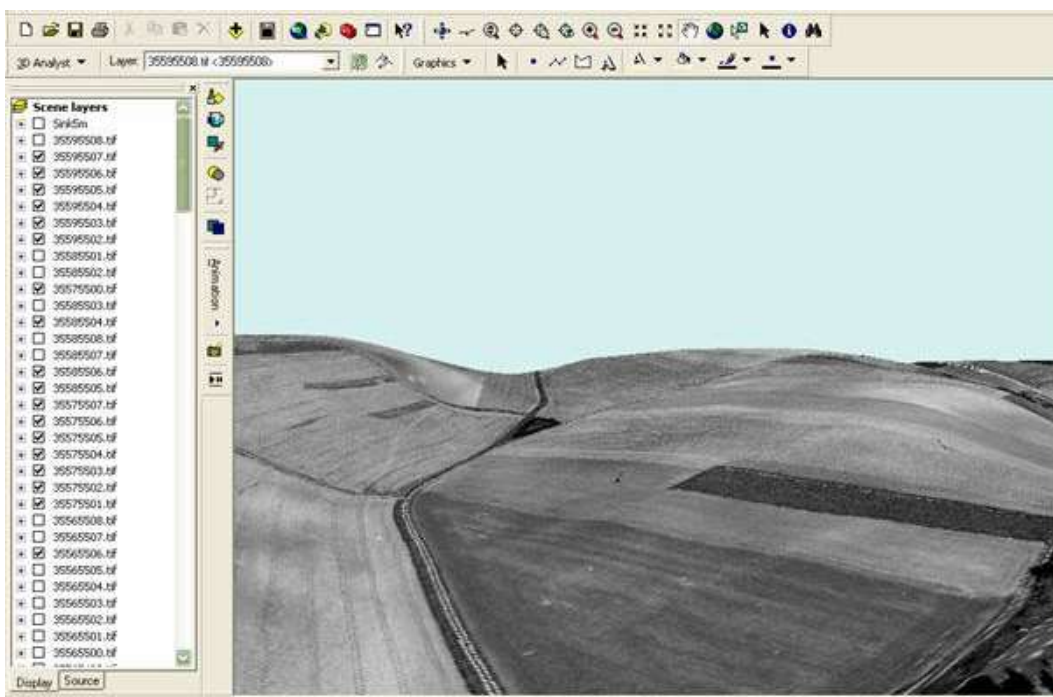


Abb. 8: Screenshot, Visualisierung einer abflusslosen Fläche - 3D-Ansicht

7. Analyse – Bodengründigkeit, Geologie und abflusslose Flächen

Die Flächen im Senkenbereich neigen zu einer starken Vernässung. Hier können Schadstoffe angesammelt und in das Grundwasser durch Sickerwässer weitergeleitet werden. Besonders ungünstig wirkt sich ein direkt anstehender Grundwasseraquifer unter einer Senke mit sehr flachgründigen Böden aus. Auf diesen Flächen können die Schadstoffe ungehindert in das Grundwasser eindringen.

Im nächsten Analyseschritt wurden verschiedenen Szenarien durchgespielt. Relevant waren hierbei die Grundwasseraquifere im Mittleren Muschelkalk, hier befinden sich die Grundwasserentnahmestellen, aber auch der direkt anschließende Obere Muschelkalk. Zudem wurde die Gründigkeit der Böden mit in Betracht gezogen.

Die Verschneidung der Polygone mit den Eigenschaften Flachgründigkeit, ackerbauliche Nutzung auf Muschelkalk und Senkenlage führt zu den Ergebnisflächen auf denen Maßnahmen für den Grundwasserschutz empfohlen werden.

Analyse – Hangneigung, Ackernutzung - Erosionsgefahr

Neben der Modellierung der Senken können Laserscannerdaten auch für die Modellierung sehr exakter und kleinflächiger Hangneigungen herangezogen werden. Durch die Verknüpfung der Bodendaten unter Ackernutzung mit der Hangneigung können erosionsgefährdete Bereiche herausgefiltert werden.

Die Lokalisierung von Flächen, die für Bodenerosion besonders gefährdet sind, bilden einen wichtigen Aspekt der Landschaftsanalyse. Grundlage hierfür bildet ein hochauflösendes Raster-DGM. Die Bodenerosion ist durch drei Hauptprozesse gekennzeichnet.

Die Hangneigung spiegelt direkt das Erosionsrisiko wieder. Die Berechnung der Hangneigung erfolgt auf Grundlage des hochauflösenden Raster-DGM durch die maximale Veränderungsrate jeder Zelle in Bezug auf die Werte der Nachbarzellen.

Die Werte des Ausgaberrasters stellen den Neigungsgrad oder die prozentuale Steigung für jede Zelle dar. Damit lassen sich Abflussgeschwindigkeiten und die Steilheit des Geländes ermitteln.



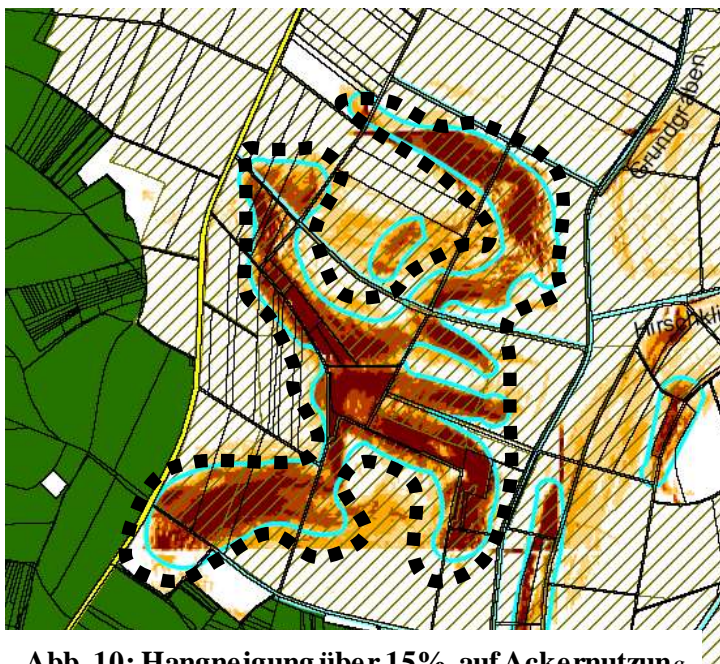
Abb. 9: Berechnung der Hangneigung in ArcGIS 9, Spatial Analyst

Wie stark der Boden erodierbar ist, hängt von der Korngrößenverteilung, der organischen Substanz, der Aggregatgröße und dem –zustand sowie der Steinbedeckung ab. Diese Eigenschaften sind bodentypenspezifisch und können zur Charakterisierung direkt zu den einzelnen Bodenarten attribuiert werden.

Die Länge eines Hanges spielt im Hinblick auf die Erosionswirksamkeit und die Menge und Geschwindigkeit des Oberflächenwassers und somit der potentiell transportierbaren Menge an Bodenmaterial eine wichtige Rolle. Die Länge eines Hanges berechnet sich aus der Länge des ungehinderten Oberflächenabflusses. Aus dem Fließrichtungs-Raster-DGM wird ein senkenfreies DGM über die Funktionen „sink“ und „fill“ erstellt. Daraus kann die Hanglänge durch die Funktion „flow accumulation“ multipliziert mit dem Zellenwert des Rasters ermittelt werden.

Der Einfluss der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung spielt eine enorme Rolle beim Erosionsabtrag. Es ist offensichtlich, dass unter Flächen mit Ackernutzung das Erosionsrisiko am höchsten ist. Deshalb wurden im Untersuchungsgebiet lediglich die Ackerflächen untersucht und dahingehend Maßnahmenempfehlungen zur Umnutzung empfohlen.

Alle Ergebnisse und Faktoren der Teilanalysen sind im Rasterformat. Im letzten Schritt soll der zu erwartende Bodenabtrag ermittelt werden, indem die verschiedenen Faktoren miteinander verknüpft werden.



Im Untersuchungsgebiet wurden alle Flächen mit einer Neigung über 15% mit den Flächen der Ackernutzung und den Flächen mit einer Gründigkeit unter 0,5m verschnitten. Die Schnittmenge stellt die potentiell erosionsgefährdeten Flächen dar, für die eine Umnutzung zu Grünland empfohlen wurde.

Abb. 10: Hangneigung über 15% auf Ackernutzung

8. Maßnahmenempfehlung für den Grundwasser- und Bodenschutz auf der Basis von Laserscannerdaten

Die nachfolgenden Grafiken zeigen exemplarisch mögliche Ergebnisse nach der Verschneidung der grundwasserrelevanten Fachthemen und die daraus abgeleiteten Maßnahmenempfehlungen:



Abb 11: Senke auf geologischer Störung u. Muschelkalk

Verschneidung der Themen:

- Geologische Störung
- abflusslose Senken
- anstehender Mittlerer Muschelkalk

→ Maßnahme: Herausnahme aus der Ackernutzung, Empfehlung einer extensiven Grünlandnutzung; WSG Zone II

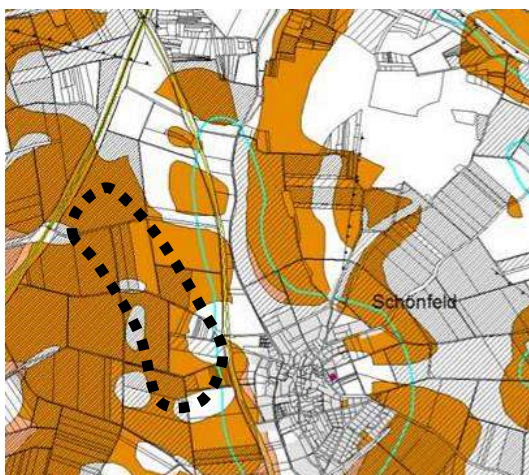


Abb. 12: Senke auf Mittlerem Muschelkalk

Verschneidung der Themen:

- abflusslose Senken
- anstehender Mittlerer Muschelkalk

→ Maßnahme: Herausnahme aus der Ackernutzung, Empfehlung einer extensiven Grünlandnutzung, WSG Zone II

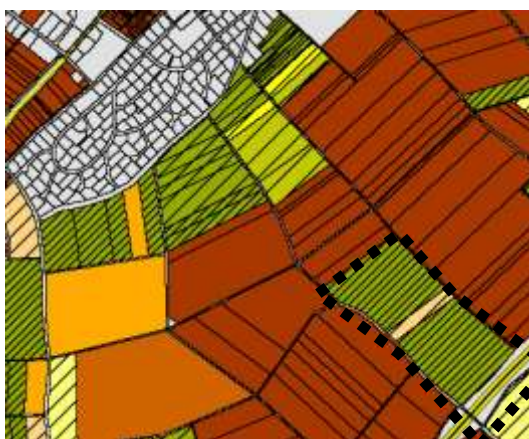


Abb. 13: Ackernutzung auf geringer Gründigkeit

Verschneidung der Themen:

- Ackernutzung
- Gründigkeit unter 0.3m
- Bodenart (durchlässig,)

→ Maßnahme: Herausnahme aus der Ackernutzung, Empfehlung einer extensiven Grünlandnutzung zu führen

9. Schlussbemerkung/Fazit

Durch die Nutzung von Laserscannerdaten ist es möglich eine Vielzahl GIS-gestützter Analysen für den Boden- und Grundwasserschutz durchzuführen. Es bleibt zu hoffen, dass sich am Softwaremarkt einige Bewertungsmethoden etablieren, die sich zu bedienerfreundlichen Werkzeugen entwickeln und in der Lage sind sehr großen Datenmengen zu bewältigen.

Die kostengünstige Beschaffung der Daten fördert die Akzeptanz.

Die Methode zur Modellierung der abflusslosen Flächen mit einer anschließenden Verschneidung der bodenrelevanten Daten, verspricht eine hilfreiche Arbeitsweise zur Verbesserung der Grundwassergüte zu werden.

Literaturverzeichnis

- Ehlers, M., A. Greiwe, M. Bochow & J. Schiewe, 2004. Auswertemethoden für die Kombination von spektral und geometrisch hochauflösenden Fernerkundungsdaten, gi-reports@fzg, Vechta, No. 2.
- Schiewe, J. & M. Ehlers (Hrsg.), 2003. Geoinformatik 03: Ausgewählte Themen der Forschungsgruppe GIS/Fernerkundung, Materialien Umweltwissenschaften Vechta (MUWV), Heft 17.
- Schwalbe, E. (2003): Gebäudemodellierung in reduzierten Parameterräumen von Airborne Laserscannerdaten Technische Universität Dresden, Kurzbeschreibung Diplomarbeit S.1.
- Pfeifer, N., Stadler, P., Briese, Ch. (2001): Derivation of Digital Terrain Models in the SCOP++ Environment. Proceedings of OEEPE Workshop on Airborne Laserscanning and Interferometric SAR for Detailed Digital Terrain Models, Stockholm, Sweden
- Hansen, W., Vögtle, T. (1999): Extraktion der Geländeoberfläche aus flugzeuggetragenen Laserscanner-Aufnahmen. PFG 1999 (4): 229-236.
- Lichun Sui, 2002, Ableitung topographischer Strukturlinien aus Laserscannerdaten mit Methoden der Bildverarbeitung München Photogrammetrie • Fernerkundung • Geoinformation 6/2002, S. 423-434
- Hofmann, A.D., Maas, H.-G., Streilein, A., (2002)
Knowledge-Based Building Detection Based on Laser Scanner Data and Topographic Map Information, IAPRS International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences Vol.34, Part 3A, S.169-174
- Wever, Lindenberger (2002), Experiences of 10 years laserscanning S.1-3

Fakultät
Agrarwissenschaften &
Landschaftsarchitektur

Pixel und Profile

Beiträge
Diskussionsforum
Bodenwissenschaften

Heft 6

Osnabrück
27. Oktober 2005